



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

## **FORMACIÓN DE NIEBLA EN LA REGIÓN DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

### **TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

POHEMA DE JESÚS GONZÁLEZ VIVEROS

DIRECTOR

DR. FERNANDO GARCÍA GARCÍA  
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM.

CODIRECTOR

DR. ERNESTO DOS SANTOS CAETANO NETO  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM.

MÉXICO, D. F. ENERO 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Of. No. PCT/GTJ/972/14

**Asunto:** Aprobación de tema de tesis y asignación de jurado para examen de grado

**GONZÁLEZ VIVEROS POHEMA DE JESÚS**  
Estudiante de Maestría  
PRESENTE

Por medio de la presente me permito informarle que el Comité Académico de este Programa de Posgrado, reunido el día 28 de octubre del año en curso, aprobó a los siguientes investigadores para fungir como sinodales en su examen de grado para defender la tesis titulada: **"Formación de niebla en la región del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México"**:

Dr. Ernesto Caetano Neto	Presidente
Dr. José Agustín García Reynoso	Vocal
Dr. Fernando García García	Secretario
Dr. Friso Holwerda	Suplente
Dr. Juan Cervantes Pérez	Suplente

Sin más por el momento, me despido enviándole un cordial saludo.

Atentamente

**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Ciudad Universitaria, D.F., 30 de octubre de 2014  
EL COORDINADOR DEL PROGRAMA

  
DR. GUSTAVO TOLSON JONES

**UNAM**  
**POSGRADO**  
Ciencias de la Tierra



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. En particular, al Centro de Ciencias de la Atmósfera por brindarme la oportunidad de obtener el grado de maestra y por todo lo que conlleva obtenerlo.

Agradezco al Dr. Fernando García García y al Dr. Ernesto Dos Santos Caetano por dirigir esta investigación, por todo su apoyo, su tiempo y conocimiento que me brindaron. Por la oportunidad de nuevas experiencias académicas. Muchas gracias por todo.

Gracias al grupo de trabajo de Física de Nubes, porque siempre conté con su ayuda, disposición, orientación académica y buenos momentos, gracias al Dr. Guillermo Montero y al Ing. Víctor Zarraluqui.

Gracias a Luís Clemente López y Armenia Franco Díaz por su apoyo en esta investigación, gracias por su tiempo y por responder mis dudas sobre ciertos procedimientos. Muchas gracias por todo.

Gracias al Ing. Gustavo Vázquez Cruz del Instituto de Geografía por su apoyo con Weather Research & Forecasting (WRF).

Gracias al departamento de Instrumentación Meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera, al Ing. Wilfrido Gutiérrez López y al Ing. León Manuel García Espinosa, por el aporte de los datos de la estación automática de Texcoco.

Gracias al Dr. José Agustín García Reynoso, al Dr. Friso Holwerda y al Dr. Juan Cervantes Pérez, sinodales de esta tesis, por sus comentarios y revisión de este trabajo.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante los dos años de estudio de la maestría y al Centro de Ciencias de la Atmósfera por el apoyo económico.

### \*\*\* AGRADECIMIENTOS PERSONALES \*\*\*

**Julián González Lendechy y Rosalía Viveros González**, mis padres, quienes por ellos soy lo que deseo ser, agradezco infinitamente su amor, su apoyo en todos los sentidos, dedicación, palabras de aliento y tantas cosas que me brindan día a día. De ustedes he aprendido las cosas que le dan sentido a mi vida.

Gracias por estar en cada instante. Los amo.

A mi familia, hermanos, sobrinas y todos los que son parte de mis mejores momentos que alimentan mis sueños e ideales.

Agradecimiento especial a ti, **Alejandro Chávez Rodríguez** que has formado parte de esta nueva etapa de mi vida, gracias por tu apoyo, comprensión, alegrías, por escucharme y alentarme, pero sobre todo por tu amor que me regalas diariamente. Gracias mi amor, 7!

Gracias a todos mis amigos que siempre están presente a pesar de la distancia. Así como por sus comentarios y charlas sobre en esta investigación, gracias Rodolfo Jofre.

Agradezco a los amigos que me acompañaron y con los que tuve la oportunidad de compartir geniales momentos en la maestría, gracias Ovidio Molina y Fanny Brito.

Muchas gracias a Evi que me ayudó a resolver algunas dudas de esta investigación.

Gracias a Abraham Onofre que contribuyó apoyándome al principio de este trabajo, gracias por los datos y tu amistad.

Y a todas las personas, que durante esta investigación me brindaron de alguna forma su apoyo, creyendo en mí. Gracias.

Gracias a Dios.

**A mis padres: Julián y Rosalía**

# Índice

---

## Capítulo I

1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivo	3
1.4. Antecedentes	3
1.4.1. Tipos de niebla	3
1.4.2. Características del tipo de niebla en termodiagramas	10
1.4.3. Modelación y pronóstico de niebla	13
1.4.4. Weather Research and Forecasting (WRF)	16
1.4.5. Estimación de la temperatura de formación de niebla radiativa	26

## Capítulo II

2.1. Datos	30
2.1.1. Datos de reanálisis	30
2.1.2. METAR	30
2.2. Región de Estudio	31
2.2.1. Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México	34



## Capítulo III

3.1. Metodología -----	35
3.1.1. Caracterización de los Eventos de Niebla -----	35
3.2.2. Modelación -----	40
3.2.3. Estimación de la temperatura de formación radiativa para el AICM-	41

## Capítulo IV

4.1. Resultados-----	42
4.1.1. Caracterización y una climatología de niebla -----	42
4.1.2. Condiciones previas de evento de niebla -----	46
4.1.3. Estimaciones con radiosondeo-----	51
4.1.4. Modelación con WRF-----	53
4.1.5. Estimación de la temperatura de formación radiativa para el AICM-	62
4.2. Comentarios y conclusiones -----	65
Apéndice I. Uso de suelo usado en WRF-----	68
Apéndice II. Configuración en WRF-----	69
Apéndice III. METAR -----	73
Referencias -----	77

<b>Tabla 1.</b> Tipo de niebla según su mecanismo de formación-----	5
<b>Tabla 2.</b> Consideraciones en pronóstico de niebla -----	15
<b>Tabla 3</b> Esquemas microfísicos de WRF -----	19
<b>Tabla 4.</b> Opciones de la parametrización de Capa Límite Planetaria-----	23
<b>Tabla 5.</b> Opciones del modelo de superficie- tipo de suelo -----	24
<b>Tabla 6.</b> Opciones de la parametrización de Radiación -----	25
<b>Tabla 7.</b> Interacciones entre las parametrizaciones físicas de WR-----	26
<b>Tabla 8.</b> Configuración de los dominios-----	39
<b>Tabla 9.</b> Combinaciones utilizadas de las parametrizaciones físicas en WRF-----	39
<b>Tabla 10.</b> Valores de temperatura, viento y humedad una hora antes de la formación de un evento de niebla sobre el AICM. -----	46
<b>Tabla 11.</b> Rangos para cada tipo de niebla analizados -----	52
<b>Tabla 12.</b> Cálculo de los coeficientes <i>a</i> y <i>b</i> .-----	62

---

<b>Figura 1.</b> Formación de niebla por advección -----	6
<b>Figura 2.</b> Enfriamiento cercano a la superficie en niebla por radiación -----	6
<b>Figura 3.</b> Reducción del enfriamiento radiativo por capa nubosa sobre niebla -----	8
<b>Figura 4.</b> Formación de niebla por sistema frontal-----	9
<b>Figura 5.</b> Sistema de presión atmosférica en un frente frío-----	10
<b>Figura 6.</b> Niebla por radiación. Altura de la capa de niebla aproximada -----	11
<b>Figura 7.</b> Niebla por radiación en un termodiagrama Skew T log P -----	12
<b>Figura 8.</b> Niebla por advección en un termodiagrama Skew T log P -----	13
<b>Figura 9.</b> Estructura de WRF-ARW -----	18
<b>Figura 10.</b> Región de estudio-----	32
<b>Figura 11.</b> Climatología de precipitación para el Valle de México -----	33
<b>Figura 12.</b> Climatología de niebla en la Cuenca de México para enero -----	34
<b>Figura 13.</b> Metodología para la clasificación de los eventos de niebla en el AICM-----	36
<b>Figura 14.</b> Cálculo de Nivel de Condensación por Ascenso (NCA) en un radiosondeo -----	38
<b>Figura 15.</b> Dominios configurados en WRF -----	40
<b>Figura 16.</b> Eventos de niebla en el periodo 2003 – 2012 reportados por METAR en el AICM-	42
<b>Figura 17.</b> Hora de formación de los eventos de niebla-----	43
<b>Figura 18.</b> Hora de disipación de los eventos de niebla-----	43
<b>Figura 19.</b> Duración de los eventos de niebla-----	44
<b>Figura 20.</b> Porcentaje del tipo de niebla frontal -----	45
<b>Figura 21.</b> Tendencia de la depresión de temperatura para los casos ‘típicos’ de niebla radiativa -----	48
<b>Figura 22.</b> Tendencia de la depresión de temperatura para los casos ‘típicos’ de niebla advectiva -----	49
<b>Figura 23.</b> Tendencia de la depresión de temperatura para los casos ‘típicos’ de niebla frontal-	50

<b>Figura 24.</b> Eventos de niebla radiativa en los cuales se destaca la presencia o ausencia de la capa más seca sobre la niebla. -----	52
<b>Figura 25.</b> Modelación de evento de niebla advectiva con diferentes combinaciones de parametrizaciones físicas, comenzando 24 horas antes del evento -----	53
<b>Figura 26.</b> Modelación de evento de niebla advectiva con diferentes combinaciones de parametrizaciones físicas, comenzando 12 horas antes del evento. -----	54
<b>Figura 27.</b> Temperatura a 2m de datos observados en el AICM y de modelación con WRF. Niebla frontal -----	55
<b>Figura 28.</b> Temperatura a 2m de datos observados en el AICM y de modelación con WRF. Niebla advectiva -----	55
<b>Figura 29.</b> Temperatura a 2m. de datos observados en el AICM y de modelación con WRF. Niebla radiativa -----	56
<b>Figura 30.</b> Temperatura en la vertical de un evento de niebla tipo frontal en el radiosondeo del Observatorio de Tacubaya y modelación con parametrizaciones en WRF -----	57
<b>Figura 31.</b> Razón de mezcla de agua de nube en la vertical para niebla tipo frontal -----	58
<b>Figura 32.</b> Razón de mezcla de agua de nube. Evento advectivo, frontal y radiativo -----	59
<b>Figura 33.</b> Razón de mezcla de agua de nube en superficie para el evento advectivo -----	60
<b>Figura34.</b> Niebla modelada a las 12Z-----	60
<b>Figura 35.</b> Modelación con WRF para un evento de niebla frontal, teniendo como datos de entrada reanálisis y datos de estaciones automáticas-----	61
<b>Figura 36.</b> Correlación entre el modelo para la estimación de la temperatura de formación de niebla radiativa y los datos observados en el AICM-----	64

# Capítulo I

---

## *1.1. Introducción*

La niebla es una formación nubosa estratiforme cercana a la superficie que afecta la visibilidad, además también tiene su importancia en el ciclo hidrológico, al ser una nube y contribuir en la cantidad de humedad atmosférica persistente en un lugar. La presencia constante de niebla puede representar menor pérdida de agua por evapotranspiración y, por tanto, rendimientos hídricos más altos comparados con ecosistemas con poca niebla, pues la presencia de niebla reduce la insolación y el déficit de humedad atmosférica (Goldsmith et al., 2012).

Desde otro punto de vista, la niebla también es de interés para la navegación tanto aérea, como marítima y terrestre, y otras actividades humanas ya que, como se mencionó, es un fenómeno que afecta la visibilidad, pero es un fenómeno que no se debe minimizar debido a su importancia natural para la humedad atmosférica persistente en cierto lugar. Cabe aclarar que no todos los eventos de niebla provocan la interrupción o paralización de las operaciones en la navegación. Particularmente, para un aeropuerto esto depende de la intensidad del evento, su duración y de las normas de seguridad según el tipo de aeropuerto del que se trate, así como el tipo de pistas con las que se cuente, el equipamiento del avión para aterrizaje y detección, entre otros factores que se mencionaran más adelante.

En el presente trabajo se caracterizaron y analizaron los eventos de niebla de los últimos 10 años (2003-2012) para la región del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), para así conocer los tipos de niebla que son más recurrentes en la región. Para ello, se construyó una climatología de los tipos de niebla, las condiciones meteorológicas previas y durante los eventos, así como sus horas típicas de formación y disipación. Aunado a esto, dado que la niebla es un fenómeno que se forma dentro de la capa límite planetaria,

se analizó por medio de termodiagramas su comportamiento en la vertical y tendencias, pues dicho comportamiento es decisivo para formación y disipación.

Al conocer cómo es este fenómeno en la región de estudio y sus mecanismos de formación y disipación, se pueden fortalecer los pronósticos meteorológicos, los cuales son indispensables para la seguridad en la navegación. Así, en la segunda parte de este proyecto, se trabajó con el modelo computacional Weather Research & Forecasting (WRF), el cual es usado internacionalmente como herramienta de modelación y pronóstico meteorológico. En el presente trabajo, el modelo fue utilizado como herramienta de diagnóstico para conocer cuál es la mejor configuración de WRF que pueda modelar eventos de niebla en la región de interés.

## ***1.2. Motivación***

Desde el punto de vista para la navegación, tanto terrestre como área y marítima, la niebla es un tema de interés debido a que afecta la visibilidad. Particularmente, en un aeropuerto un evento de niebla puede representar el cierre parcial o total de éste. Este es el caso del Aeropuerto Internacional de Ciudad de México (AICM) “Benito Juárez”, el más importante del país debido al número de operaciones que se llevan a cabo: 53 por hora (Herrera, et al., 2005). Por lo anterior, un evento de niebla lleva a temas importantes de seguridad y costos que se pueden generar para el aeropuerto.

Del mismo modo, si para tales impactos se toma en cuenta que la visibilidad constituye una de las variables meteorológicas más difíciles de pronosticar con los modelos numéricos<sup>1</sup>, entonces es clara la importancia de comprender cabalmente los procesos involucrados en los eventos de niebla, así como la necesidad de aplicar técnicas y enfoques modernos al problema de pronóstico.

---

<sup>1</sup>[https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/dynfog\\_es](https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/dynfog_es)

### ***1.3 Objetivo***

1.- Caracterizar los eventos de niebla en diez años (2003 – 2012) del AICM.

- Clasificar los eventos de niebla del AICM.
- Analizar la tendencia de las variables: humedad, temperatura y viento 6 horas previas al evento.
- Conocer la duración, las horas típicas de formación y disipación de los eventos.
- Estimar el espesor de la capa de niebla
- Estimar el área que cubren los casos de niebla.

2.- Modelar algunos eventos de niebla pasados con Weather Research & Forecasting (WRF) para investigar cual es la mejor configuración por medio de parametrizaciones físicas del modelo en la región de la Cuenca de México

- Estimar la temperatura de formación de niebla radiativa para el AICM.

### ***1.4. Antecedentes***

#### ***1.4.1. Tipos de niebla***

La niebla se define como gotitas de agua típicamente (diámetro menor a 0.1 mm) suspendidas en la atmósfera en la proximidad de la superficie de la tierra que afectan la visibilidad (Jiusto, 1981). De acuerdo con la definición internacional, la niebla reduce la visibilidad por debajo de 1 km (Organización Meteorológica Mundial)<sup>2</sup>, definiéndose como visibilidad la distancia horizontal máxima a la que un observador puede distinguir claramente algunos objetos de referencia en el horizonte (Servicio Meteorológico Nacional)<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup>[http://www.wmo.int/gsearch/gresults\\_es.html?q=Niebla&submit.x=0&submit.y=0&submit=SEARCH#gs\\_c.tab=0&gsc.q=Niebla&gsc.page=4](http://www.wmo.int/gsearch/gresults_es.html?q=Niebla&submit.x=0&submit.y=0&submit=SEARCH#gs_c.tab=0&gsc.q=Niebla&gsc.page=4) 3

<sup>3</sup>[http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=148:n&catid=13&Itemid=2](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=148:n&catid=13&Itemid=2)

Debido a que la niebla es una formación nubosa de tipo estratiforme cercana a la superficie, los mismos factores que generan una niebla son los que pueden originar otro tipo de estrato (Byers, 1959). En general, los mecanismos de formación de una nube estratiforme son por enfriamiento isobárico, el cual consiste de un enfriamiento del aire hasta la temperatura de punto de rocío o por debajo, por adición de vapor de agua en el aire. Otro mecanismo es por mezcla vertical de parcelas húmedas de aire de diferentes temperaturas (Mason, 1961). Para que se lleve a cabo la condensación, es indispensable la presencia núcleos de condensación de nube, los cuales son partículas higroscópicas suspendidas en la atmósfera, es decir, partículas de aerosol atmosférico que debido a sus propiedades permiten que sobre él comience a ocurrir la condensación del vapor de agua o nucleación (Salas, 2005).

De la misma manera, la niebla es importante en el ciclo hidrológico, ya que es fundamental para entender el balance hídrico atmosférico, en el cual es relevante para la vegetación, la recarga de agua subterránea y la cantidad de humedad atmosférica recurrente en un lugar, la cual se puede aprovechar para captación de agua de niebla para diversas actividades humanas, especialmente en regiones áridas y costeras (Ingraham and Mathews, 1988). Para las regiones áridas en México la niebla, formada principalmente por el paso de frentes fríos, es una importante fuente de humedad en invierno.

Así mismo, se ha demostrado que muchas plantas en ecosistemas de niebla tienen la capacidad de absorber el agua de la niebla que fue interceptada por sus hojas, lo que se conoce como absorción foliar de niebla, lo cual representa muchos beneficios a nivel fisiológico, como la hidratación directa de las hojas y una mayor fotosíntesis después de que las hojas se secan (Goldsmith et al., 2012).

Existen diferentes clasificaciones de tipos de niebla. Una de ellas es por el mecanismo de formación, elaborada por Willet y Byers (tabla 1), en la cual se pueden distinguir tres grandes tipos: *niebla por advección*, *niebla por radiación* y *niebla por sistema frontal* (Jiusto, 1981).



**Tabla 1.** Tipo de niebla según su mecanismo de formación

<i>Tipo</i>	<i>Factores para la formación</i>
<b>Por advección</b>	Brisa de valle y montaña
	Niebla de mar
	Niebla por aire tropical
	Niebla de vapor (Principalmente por superficies cubiertas de hielo)
	Forzamiento orográfico
	Niebla por advección-radiación
<b>Por radiación</b>	Niebla de suelo
	Niebla por una intensa inversión térmica
	Niebla por expansión adiabática
<b>Frontal</b>	Prefrontal – Antes de un frente cálido
	Posfrontal-Después del paso de un frente frío
	Durante el paso de un frente
<b>Otros</b>	Niebla sobre superficie congelada/hielo
	Niebla de nieve

El tipo de *niebla por advección* ocurre cuando una masa de aire se desplaza sobre una superficie con diferentes características térmicas, provocando la condensación cercana a la superficie (Figura 1). Esto se puede generar cuando una corriente de aire cálido y húmedo se desplaza sobre una superficie más fría, o cuando pasa aire frío encima de una superficie acuática más cálida, o con suficiente humedad para condensar. A medida que el aire frío pasa sobre la superficie, la evaporación introduce vapor de agua en la masa de aire y aumenta el contenido de humedad cerca de la superficie. El resultado es la formación de niebla en los niveles más bajos: el aire se enfría desde abajo, su humedad relativa aumenta y el vapor de agua se condensa formando la niebla (Mack y Katz, 1976). Por lo tanto, la niebla por advección se forma principalmente a través de procesos dinámicos y adiabáticos de la capa límite y está dominada por procesos de escala sinóptica que afectan el evento a lo largo de su duración.

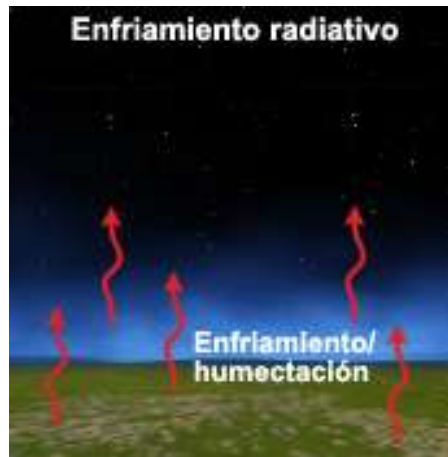
Por otro lado, en algunas ocasiones los procesos radiativos participan en la evolución y ciclo de vida de la niebla por advección, aunque éstos predominan. La formación puede ocurrir con vientos entre calmos y moderados en los niveles bajos. Si el viento es intenso, es probable que la niebla se aleje del suelo formándose otro tipo de estrato. Si el aire, por el contrario, está calmo, el vapor de agua se podría depositar sobre el suelo formando rocío y evitando la formación de niebla<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>[http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/contents.html](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html)



**Figura 1.** Formación de niebla por advección (tomado de Web-MetEd3.)

La *niebla por radiación* se produce por el enfriamiento que sufre la atmósfera como consecuencia de la pérdida nocturna de calor lo cual, junto con vientos calmos o débiles, propicia la condensación cerca de la superficie al producirse una mezcla turbulenta débil pero suficiente para maximizar el enfriamiento radiativo. Esto puede ser apoyado por la presencia de un anticiclón en los niveles bajos, el cual puede suprimir los vientos de superficie y desecar el aire en altura por subsidencia, lo que contribuye a crear condiciones propicias para la formación de niebla por radiación (Brown y Poach, 1976).



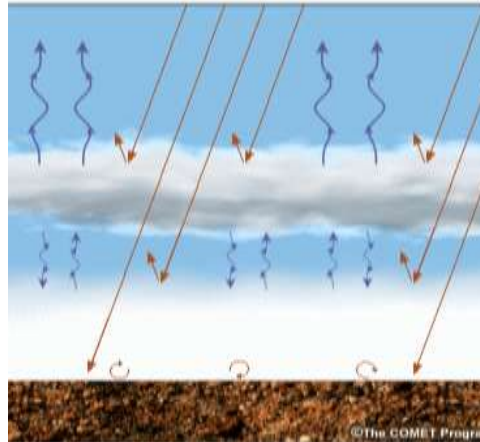
**Figura 2.** Enfriamiento cercano a la superficie en niebla por radiación.

Aunado a esto, es muy importante la presencia de humedad, ya que es muy poco probable que se forme niebla por radiación si no hay suficiente humedad en la capa límite. La humedad puede haber sido transportada a la zona o ser el producto de la evaporación diurna de la superficie o por evapotranspiración vegetal. Cuando cesa el calentamiento diurno, la existencia de condiciones secas y despejadas arriba de la capa límite acelera el enfriamiento en y cerca de la superficie (Figura 2). Por otro lado, si el cielo está nublado durante la noche, se estima que menos del 10% de la radiación emitida por el suelo escapa al espacio, por lo que es importante que el cielo este despejado para que permita que entre el 20 y el 30% de la radiación escape de la atmósfera y se lleve a cabo dicho enfriamiento. Conforme la energía escapa al espacio, la superficie del suelo se enfría rápidamente e induce el enfriamiento de la capa más baja de la atmósfera, de algunos metros de profundidad, creando una inversión térmica poco profunda en la superficie (Baker et al., 2000). Así, el enfriamiento radiativo progresa hasta el punto en que el aire justo arriba del suelo queda sobresaturado y se forman gotitas de niebla por condensación. Es importante mencionar que, debido al contenido de humedad más alto, en regiones tropicales húmedas se experimenta un menor enfriamiento radiativo, de modo que la inversión suele ser más débil que en las latitudes medias. Una vez que la capa de niebla alcanza varios metros de profundidad, la radiación proveniente del suelo se comienza a absorber y remitir, lo que reduce la velocidad de enfriamiento en el suelo y la superficie de la capa de niebla coincide con el nivel donde los procesos de enfriamiento radiativo y condensación son más activos<sup>5</sup>.

En general, la fase de mantenimiento de una capa de niebla consiste en establecer un equilibrio entre la condensación en la superficie de la capa de niebla y los procesos de evaporación y asentamiento de las gotitas, lo cual mantiene la profundidad de la capa de niebla. En la superficie de la capa de niebla, el enfriamiento radiativo reabastece la niebla de gotitas al tiempo que van asentándose, e incluso tiende a fortalecer la inversión térmica y profundizar la capa de niebla. A la vez, la mezcla turbulenta tiende a debilitar la inversión térmica y erosionar la superficie de la capa de niebla. Normalmente, una capa de niebla por radiación se profundiza durante la fase de crecimiento hasta alcanzar la altura donde los vientos son lo suficientemente fuertes como para inducir la mezcla necesaria en la superficie de la capa de niebla para detener su crecimiento (Low, 1979).

---

<sup>5</sup>[http://www.meted.ucar.edu/fog\\_int\\_es/](http://www.meted.ucar.edu/fog_int_es/)



**Figura 3.** Reducción del enfriamiento radiativo por capa nubosa sobre niebla.

Si se presenta una capa seca sobre la capa de niebla, la incorporación de aire seco por mezcla turbulenta en la superficie de la capa de niebla ocasiona la evaporación de las gotitas, lo cual se puede intensificar si hay cizalladura de velocidad vertical dentro y arriba de la superficie de la capa de niebla.

Por otro lado, si existe una capa nubosa sobre la capa de niebla, se reducirá el enfriamiento radiativo y la condensación en la capa de niebla por lo que, cuanto menor sea la altura de la capa nubosa sobre la niebla, se incrementarán los procesos de disipación tales como el asentamiento de las gotitas (Figura 3).

El *tipo de niebla frontal* puede considerarse como advectiva, ya que la condensación se lleva a cabo por el desplazamiento masas de aire de diferentes características térmicas sobre una superficie. Sin embargo, este tipo de niebla se destaca por el sistema sinóptico que la origina: sistemas frontales, frecuentemente frentes fríos, aunque un frente cálido podría provocar niebla si pasa sobre una superficie fría. La niebla puede formarse antes de la entrada de un frente, durante o después del paso de este. Es común que la niebla se forme en la cuña de aire frío debajo y junto al límite de un frente cálido a medida que el aire caliente se ve forzado a subir encima de la cuña fría. La combinación de enfriamiento evaporativo y advección de la humedad hacia la capa permite que el aire frío subyacente quede saturado (Figura 4). Del mismo modo, la niebla del tipo frontal también puede

adquirir su humedad por la precipitación que puede ocasionar la entrada de un frente (Martínez, 2006).



**Figura 4.** Formación de niebla por sistema frontal.

Entre los sistemas de baja presión que tienden a formar niebla delante de un frente cálido se incluyen los sistemas de baja presión u ondas abiertas que tienen orientación paralela respecto de las isobaras y se mueven lentamente, sin intensificarse. Normalmente, las depresiones en fase de intensificación no producen mucha niebla delante de un frente cálido.

Por otra parte, al paso de un frente se puede formar niebla y estratos detrás de un frente frío cuando una bóveda poco profunda de aire frío se desplaza a determinada región y obliga al aire húmedo y cálido en altura a ascender.

Cuando es el caso de frentes estacionarios, arriba de la capa frontal puede producirse advección cálida capaz de ocasionar precipitación por la advección del aire cálido encima de aire frío. En estos casos, buena parte de la niebla y estratos se hallarán a lo largo y en ambos lados del límite frontal. Además, la convergencia a lo largo del frente estacionario puede contribuir a la formación de niebla y estratos (Web-MetEd1).

En general, la fase de disipación de un evento de niebla es debido a que la profundidad de una capa de niebla disminuye cuando la velocidad de formación de gotitas es menor que la

velocidad de asentamiento. El tamaño de las gotitas de niebla varía y las gotitas más pequeñas caen más despacio que las de tamaño mayor. La gotita de niebla promedio, que tiene un diámetro de 20 micrómetros, cae a una velocidad de 1 cm/s (Low, 1979).

#### 1.4.2. Características del tipo de niebla en termodiagramas

En un termodiagrama Skew T Log P, puede observarse características que las distinguen a los tres tipos de niebla principales: advectiva, radiativa y frontal. Sin embargo, el tipo de niebla por sistema frontal, comparte características similares en un termodiagrama que una de tipo advectivo, lo cual es debido a la naturaleza del mecanismo de formación del evento de niebla frontal explicado anteriormente. Es por ello que sólo se hará referencia a las nieblas radiativas y advectiva en esta sección de las características en termodiagramas.

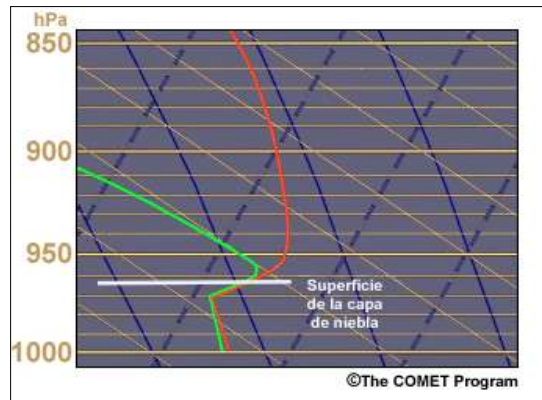
Cabe mencionar que cuando un evento de niebla frontal se forma antes o durante el paso de un frente, en los datos del termodiagrama de horas previas se puede observar el aumento de presión en superficie (Martínez, 2006), característica típica de la entrada de un frente frío, ya que éste al pasar por cierto lugar desplaza un sistema de alta presión a un sistema de baja presión atmosférica (Figura 5).



**Figura 5.** Sistema de presión atmosférica en un frente frío.

Como se mencionó anteriormente, *la niebla por radiación* es principalmente debido a un enfriamiento radiativo unas horas antes del evento de niebla, especialmente en la noche, formando niebla en la madrugada o en las primeras horas de la mañana (Hobbs, 1981). Por esta razón, cerca de la superficie de la capa de niebla hay una inversión térmica cuya base

suele encontrarse unos 50 metros por debajo de la superficie de la capa de niebla. El límite superior de la inversión térmica está justo arriba de la superficie de la capa de niebla, como se observa en el termodiagrama de la figura 6.



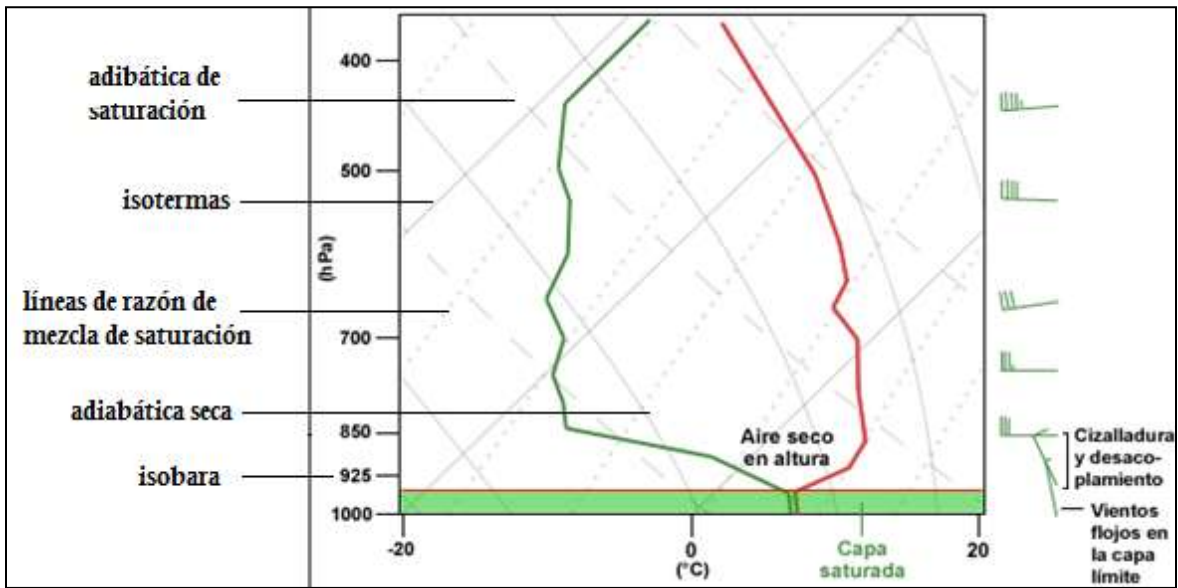
**Figura 6.** Niebla por radiación. Altura de la capa de niebla aproximada. (Imagen tomada de Web-MetEd2)

Las características típicas observadas en un tipo de niebla por radiación son (Figura 7):

- ❖ Vientos calmos o poco intensos en superficie.
- ❖ Cizalladura del viento sobre la capa de niebla.
- ❖ Inversión de temperatura sobre la capa de niebla.
- ❖ Una capa de aire seco sobre la capa de niebla. La presencia de esta capa depende de la intensidad del evento de niebla.

En la figura 7 y 8 se muestra las características de las nieblas radiativas y advectivas en un termodiagrama Skew T log P, en el cual se muestra un perfil vertical de temperatura ambiente (línea de color verde) y de temperatura de punto de rocío (línea color rojo), así como la intensidad del viento. La información que muestra un termodiagrama de este tipo es por medio de isotermas, adiabáticas secas, adiabáticas saturadas, líneas de razón de mezcla de saturación e isobaras.





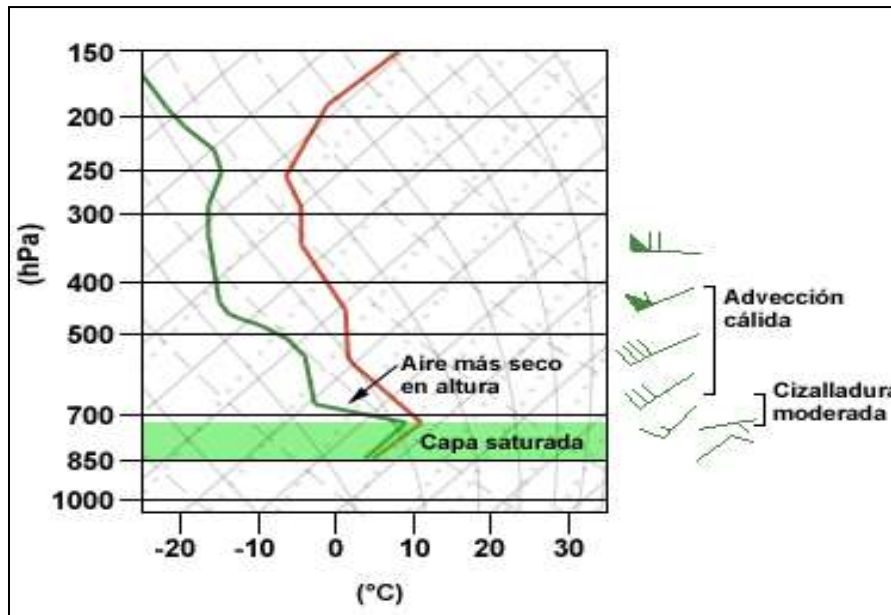
**Figura 7.** Niebla por radiación en un termodiagrama Skew T log P.

Respecto a la niebla por advección, en un termodiagrama se caracteriza por (Figura 8):

- Una inversión de temperatura en superficie.
- Viento débil o moderado en superficie.
- Cizalladura del viento en superficie
- Advección cálida y con velocidades de viento mayores que en superficie sobre la capa de niebla.
- Presencia de una capa de aire seco sobre la capa de niebla, la cual depende de la intensidad del evento de niebla<sup>6</sup>.

<sup>6</sup><http://www.meted.ucar.edu/dlac/lesson1/print.htm>





**Figura 8.** Niebla por advección en un termodiagrama Skew T log P.

### ***1.4.3. Modelación y pronóstico de niebla***

En general un pronóstico meteorológico es aquél que predice científicamente el estado de la atmósfera para un cierto lugar y determinado tiempo, basado en modelos numéricos que resuelven las ecuaciones que gobiernan la atmósfera, teniendo como variables de entrada datos meteorológicos, como por ejemplo: temperatura ambiente, humedad atmosférica, velocidad y dirección del viento, radiación solar, presión atmosférica, entre otras variables. Conocer el estado del tiempo permite la planeación de diversas actividades humanas, lo cual tiene su importancia en el ámbito social, de seguridad, económico y cultural.

Una parte del pronóstico del tiempo atmosférico se basa en las situaciones similares del pasado, es por ello que la climatología se considera como un buen indicador del futuro para la persistencia del tiempo atmosférico (Hilliker y Fritsch, 1999).

Para el caso específico de un pronóstico de niebla, es importante tomar en cuenta diferentes factores descritos en la tabla 2, los cuales son indicativos de su formación, así como para su duración y disipación (Web-MetEd3).

A través de los años se han realizado varios estudios sobre el pronóstico de niebla con diferentes modelos y técnicas, como es el caso de España con el High Resolution Limited Area Model (HIRLAM) para el aeropuerto de Barajas (Cano et al., 2001); como también con el modelo de estabilidad atmosférica COBEL 1D utilizado en aeropuertos de París, Francia y de Zúrich, Suiza (Müller, 2005); y por medio de modelos estadísticos como el Model Output Statistics (MOS) aplicado en varios aeropuertos de Estados Unidos en la década de 1990 (Vislocky y Fritsch, 1997); por mencionar algunos. Entre otros modelos atmosféricos que han ido adquiriendo popularidad debido a sus resultados, actualmente en varios lugares se trabaja con el modelo Weather Research & Forecasting (WRF), como es el caso de Corea del Sur y Estados Unidos, por mencionar algunos lugares, los cuales trabajan con resolución máxima de  $1^\circ \times 1^\circ$  (Cheol et al., 2008).

Además, de modelos numéricos, también se han desarrollado caracterizaciones de eventos de niebla por medio de datos meteorológicos históricos en diferentes lugares como: Varsovia, Polonia (Bakowski, 2005), en el aeropuerto de Melbourne, Australia (Newman, 2001), en el Aeropuerto Internacional de Incheon, Corea del Sur (Chang Ki & Yum, 2009), en el aeropuerto de Sofía, Bulgaria (Latinov, 2001), en el Cape Town International Airport (CTIA), de Sudáfrica (Van Schalkwyk y Dyson, 2013), entre otros. Del mismo modo, las imágenes de satélite han sido usadas para estudiar estos eventos (Jerez, 2011).

En general, los pronósticos meteorológicos especializados en niebla tienen como limitante la resolución para trabajar los modelos numéricos, ya que la niebla puede ser un fenómeno de escala local influenciado por fenómenos de mayor escala, como por ejemplo la niebla de tipo frontal, por lo tanto dentro de los retos de un pronóstico de niebla es pronosticar la hora, duración, cobertura y visibilidad de los eventos de niebla. Algunos autores como Chang Ki & Yum (2009) han tenido éxito en pronosticar la cobertura de la niebla radiativa, pero difícilmente se ha tenido buenos resultados en cuanto a la hora de formación de niebla

y visibilidad, lo cual explica que se puede deber a la presencia de nubes de chubascos para su región de estudio.

En México, un pronóstico meteorológico especializado para niebla no existe, es por ello que es esta investigación se analizan simulaciones de eventos pasados con WRF, con el propósito de tener las características de los procesos de formación de la niebla para la región de interés, las cuales son la base para las simulaciones, y conocer la mejor configuración de WRF para los eventos de niebla.

**Tabla 2.** Consideraciones en pronóstico de niebla

Factor	Consideraciones para el pronóstico
Estabilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El aumento en la estabilidad estática dentro de la capa límite estimula la formación de niebla.</li> <li>• La intensidad de la inversión térmica y la tendencia del pronóstico ofrecen indicios acerca de la duración del episodio de niebla o estratos.</li> <li>• La cantidad de mezcla turbulenta que se espera: una mezcla más fuerte y más profunda contribuye a disipar la niebla o estratos.</li> <li>• La profundidad del aire frío/fresco y de la inversión térmica.</li> </ul>
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La intensidad y tipo de advección de la temperatura.</li> <li>• La advección de aire cálido encima de aire frío puede estimular la formación de niebla o estratos.</li> <li>• La advección de aire frío y seco disipa la niebla o estratos.</li> </ul>
Posición/movimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las condiciones de techo de nubes y visibilidad cerca y delante del frente ofrecen indicios acerca de las condiciones que se pueden esperar a medida que se acerca el frente.</li> <li>• La ubicación de la zona del pronóstico respecto del frente.</li> <li>• La cantidad de tiempo que se prevé que el frente permanecerá estacionario o que tardará en pasar por la región.</li> <li>• La intensidad y el alcance del forzamiento sinóptico asociado con el sistema frontal. Un forzamiento intenso o profundo impide la formación de niebla o estratos, o los disipa una vez formados.</li> </ul>
Humedad/precipitación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La advección seca o húmeda esperada.</li> <li>• La profundidad y el contenido de humedad del aire frío existente: es menos probable que una capa delgada de aire frío produzca niebla o estratos.</li> <li>• ¿Se anticipa precipitación delante del frente? Esto puede precondicionar la atmósfera.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>El tipo de precipitación y su extensión. Una precipitación ligera sobre una zona extensa puede contribuir a saturar los niveles inferiores sobre un área amplia y estimular la formación de estratos o niebla sobre grandes zonas.</li> </ul>
Condiciones del suelo/terreno	<ul style="list-style-type: none"> <li>El estado de la superficie subyacente (humedad del suelo, vegetación, cubierta de nieve, etc.). Un suelo húmedo contribuye a crear condiciones de superficie favorables a la formación de niebla.</li> <li>El potencial de flujo orográfico (de ladera) ascendente o descendente, antes y después del paso del frente. Un flujo orográfico ascendente contribuye a la formación de niebla y estratos, mientras un flujo de ladera descendente puede inhibir su formación.</li> </ul>
Otros factores	<ul style="list-style-type: none"> <li>La climatología de techo de nubes, visibilidad y precipitación delante y detrás del frente. Los antecedentes climatológicos ayudan a definir las condiciones de niebla o estratos típicas para un evento en particular.</li> </ul>

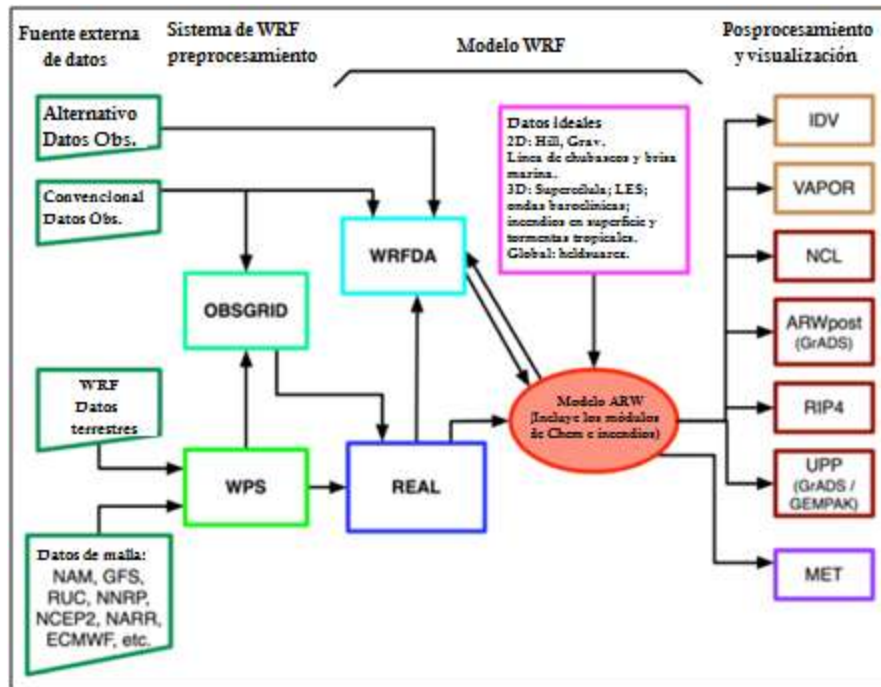
#### ***1.4.4. Weather Research and Forecasting (WRF)***

Es un modelo de simulación de la atmósfera de área limitada, no hidrostático, sensible a las características del terreno y diseñado para predecir la circulación atmosférica a escala sinóptica, mesoescala y regional. Las principales características del modelo son: la capacidad de anidamiento múltiple de malla; la configuración dinámica y no hidrostática que permite ser usado en una escala de unos pocos kilómetros; al estar dividido en módulos, permite una gran capacidad de asimilación de información, así como la modificación o selección de parametrizaciones físicas (Guerrero-Higueras et al., 2007).

El WRF ha sido desarrollado desde el 2004 por National Center for Atmospheric Research (NCAR), la National Oceanic and Atmospheric Administration (representada por el National Center for Environmental Prediction (NCEP) y el Forecast Systems Laboratory (FSL)), la Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory, la Universidad de Oklahoma y la Federal Aviation Administration (FAAA).

El modelo WRF-ARW (Advanced Research WRF) se encuentra estructurado como se muestra en la figura 9, cuyos módulos son descritos a continuación:

- GEOGRID: Permite configurar el área geográfica objeto de estudio, teniendo en cuenta la topografía, usos del suelo y características físicas del terreno en función de la época del año. El dominio seleccionado queda definido por las coordenadas geográficas de las fronteras de dicho dominio. El anidamiento es necesario para realizar pronósticos en áreas del orden de mesoescala. La resolución espacial de las condiciones iniciales fijadas desde un modelo de circulación general obliga a definir dominios que permitan ejecutar el modelo, imponiendo las condiciones de contorno necesarias para asegurar la estabilidad de las salidas.
- UNGRIB: Prepara los datos de inicialización del modelo y las condiciones de contorno, fijados por la salida de un modelo de mayor cobertura espacial, como GFS o ECMWF, adaptándose a las características de los dominios definidos en METGRID.
- METGRID: Interpola horizontalmente los diferentes campos meteorológicos extraídos de los datos de inicialización del modelo.
- REAL: Realiza la interpolación vertical de los datos y define las coordenadas de presión.
- WRF: Contiene las ecuaciones físicas de pronóstico y diagnóstico para un cierto tiempo. En este módulo se incluyen también las parametrizaciones que permiten describir los fenómenos físicos cuyas escalas espacial y temporal son inferiores a la resolución fijada en las simulaciones (Información tomada de Web-UCAR).



**Figura 9.** Estructura de WRF-ARW (Tomada de ARW, 2010)

Los ficheros que componen las salidas del modelo son con formato netCDF (network Common Data Form), el cual es un conjunto de interfaces de acceso para datos en forma de arreglos y para acceso de datos leídos por C, Fortran, C++, Java y otros lenguajes de programación. Este tipo de formato permite que se incluya información sobre los datos que contiene, que sea portable y accesible de manera eficiente, además de que es posible añadir datos sin redefinir su estructura, permitiendo accesos a los datos de forma simultánea y las versiones futuras y versiones anteriores de netCDF.

Las opciones físicas con las que cuenta WRF se encuentran en las siguientes categorías: microfísicas, parametrizaciones de Cumulus, Capa Límite Planetaria (CLP), modelo de superficie – uso de suelo y radiación.

**Microfísicas** - incluye explícitamente soluciones para los procesos de vapor de agua, nubes y precipitación. En la versión actual de la ARW, la microfísica se lleva a cabo al final del paso de tiempo como un proceso de ajuste y, por lo tanto, no proporciona tendencias. La razón de esto es que el ajuste de condensación debe ser al final del paso de tiempo para

garantizar que el equilibrio de saturación final sea preciso para la temperatura y la humedad actualizadas. Sin embargo, también es importante tener el forzante de calor latente para la temperatura potencial durante las subetapas dinámicas, el cual se mantiene como una aproximación para el siguiente paso de tiempo.

Los esquemas microfísicos se muestran en la tabla 3, se puede observar cuales de estos trabajan con procesos de hielo, sin formación de hielo o con fases mixtas.

**Tabla 3** Esquemas microfísicos de WRF

Esquema	Procesos de fase-Hielo	Procesos de Fase-mixta
Kessler		
Purdue Lin	✓	✓
WSM3	✓	
WSM5	✓	
Eta GCP	✓	✓
Thompson	✓	✓
Goddard	✓	✓
Morrison 2 – Moment	✓	✓

El esquema Kessler es un esquema de la nube caliente simple que incluye vapor de agua, agua de las nubes y la lluvia. Los procesos microfísicos incluidos son: la producción, la caída y la evaporación de la lluvia; la acreción y autoconversión de agua de las nubes; y la producción de agua de las nubes por condensación (Kessler, 1969).

En el esquema de Purdue Lin, seis clases de hidrometeoros se incluyen: vapor de agua, agua de las nubes, lluvia, nube con hielo, nieve y granizo blando. Todas las parametrizaciones de producción se basan en Lin et al. (1983) y Rutledge y Hobbs (1984) con algunas modificaciones, las cuales incluyen un ajuste de saturación realizado por Tao et al. (2003) y la sedimentación de hielo (Chen y Sun, 2002).

El esquema de microfísica WSM3 incluye la sedimentación de hielo y otras nuevas parametrizaciones de fase de hielo. Una diferencia importante con los otros esquemas es que una relación de diagnóstico se utiliza para la concentración del número de partículas de hielo, que se basa en el contenido de masa de hielo en lugar de la temperatura. Sin embargo, al igual que con WSM5 y WSM6, los procesos de congelación o fusión se calculan durante las subetapas de caída para aumentar la precisión en el perfil de calentamiento vertical durante estos procesos. El orden de los procesos también se optimiza para disminuir la sensibilidad del sistema para el paso de tiempo del modelo. El esquema WSM3 predice tres categorías de hidrometeoros: vapor, nube de agua/hielo, y lluvia/nieve, que es llamado un esquema simple de hielo. De esto, se asume el agua de nube y la lluvia para temperaturas por encima de cero, y la nube con hielo y nieve para temperaturas por debajo de cero. Este esquema es computacionalmente eficiente para la inclusión de los procesos de hielo, pero carece de agua superenfriada y de tasas de fusión graduales.

Con respecto al esquema WSM5, es similar al esquema simple de hielo WSM3. Sin embargo, el vapor, lluvia, nieve, hielo en la nube, y agua de las nubes se realizan en cinco conjuntos diferentes. Por lo tanto, permite que el agua superenfriada existente, y una fusión gradual de la nieve, caigan por debajo de la capa de fusión. Este esquema sigue un ajuste de saturación para los procesos separados de hielo y saturación de agua, en lugar de una saturación mixta como los esquemas de Purdue Lin y Goddard. Este esquema es eficiente para la resolución de malla en mesoescala y malla para procesos de nubes.

Por otra parte, el esquema WSM6 (esquema de seis clases) extiende el esquema WSM5 para incluir granizo blando y sus procesos asociados. Algunos de los términos relacionados con el granizo blando-siguen se establecieron según Lin et al., (1983), pero el comportamiento de fase de hielo es muy diferente debido a los cambios introducidos por Hong y Lim (2006). Un nuevo método para representar las fases mixtas para partículas de nieve y granizo blando se realiza mediante la asignación de un único valor para la velocidad de caída, el cual se pondera por la razón de mezcla; esto se aplica tanto a procesos de sedimentación como de acreción. La principal diferencia en el comportamiento de los esquemas WSM3, WSM5 y WSM6 se muestra para malla con mayor resolución,



teniendo diferencias significativas en mallas para resolución de nubes. De los tres esquemas WSM, el esquema WSM6 es el más adecuado para mallas de resolución de nubes, teniendo en cuenta la eficiencia y las bases teóricas (Hong y Lim, 2006).

El esquema EGCP01, también llamado esquema de Eta Ferrier, predice cambios en el vapor de agua y condensado en las formas de agua nube, lluvia, hielo en nube, y precipitación de hielo (nieve / granizo / aguanieve). Los campos de hidrometeoros individuales se combinan en la condensación. La densidad de precipitación de hielo se estima a partir de una matriz local que almacena información sobre el crecimiento total de hielo por deposición de vapor y la acumulación de agua líquida. La sedimentación es tratada mediante la partición del flujo promedio de precipitación. Este enfoque, junto con modificaciones en el tratamiento de procesos microfísicos rápidos, permite grandes pasos de tiempo para ser utilizados con resultados estables. Respecto a los procesos de fase mixta se consideran ahora a temperaturas mayores a  $-30^{\circ}\text{C}$  (previamente  $-10^{\circ}\text{C}$ ), mientras que la saturación de hielo se asume para condiciones de nubosidad en temperaturas más frías.

El esquema de Thompson toma en cuenta la densidad de nieve variable, formas no necesariamente esféricas, tomando los valores de observaciones, y la intersección de la lluvia depende de la proporción de razón de mezcla de lluvia y la fusión del hielo, del mismo modo la intersección de granizo blando depende de la relación de mezcla del granizo blando.

Por otra parte, el esquema de Goddard Cumulus Ensemble (GCE) permite elegir ya sea granizo o granizo en la tercera fase para la formación hielo, el cual toma en cuenta al graupel con una densidad relativamente baja y un alto valor de intercepción (es decir un número alto de partículas pequeñas). En contraste, al granizo lo toma con alta densidad relativa y un valor bajo de intercepción (es decir, mayor número de partículas grandes). Respecto a las técnicas de saturación están básicamente diseñadas para asegurar que la sobresaturación no exista en algún punto de la cuadrícula donde no haya nubes. En tercer lugar, todos los procesos microfísicos que no implican la fusión, evaporación o sublimación (es decir, las tasas de transferencia de un tipo de hidrometeoros a otro) se calculan en

función de estados termodinámicos. Esto asegura que todos estos procesos son tratados por igual.

La última parametrización microfísica es el esquema de Morrison, el cual toma en cuenta vapor, gotitas de nube, nubes de hielo, lluvia, nieve y granizo / graupel. Trabaja la predicción en dos momentos, es decir, tanto la concentración de partículas y la razón de mezcla, permitiendo un tratamiento más robusto de las distribuciones por tamaños de partícula, que son clave para el cálculo de las tasas de proceso microfísicos y evolución de las nubes / precipitación.

**Parametrizaciones de Cumulus** - Estos esquemas son responsables de los efectos sub-cuadrícula de escala de nubes convectivas y / o superficiales. Las parametrizaciones Cumulus son teóricamente para alta resolución (por ejemplo, superior a 10 km), donde son necesarias para liberar adecuadamente el calor latente en una escala de tiempo realista en las columnas convectivas. Para esta investigación, esta parametrización no fue usada ya que la niebla es una nube estratiforme.

**Capa Límite Planetaria (CLP)**- Este esquema es responsable de flujos verticales de escala sub-cuadrícula, son debidos a transportes turbulentos en toda la columna atmosférica, no sólo la capa límite. Las opciones del esquema de CLP determinan los perfiles de flujo en la capa límite bien mezclada y en la capa estable y, por lo tanto, proporcionan tendencias atmosféricas de temperatura, humedad (incluyendo nubes) y el empuje horizontal en toda la columna atmosférica; también consideran mezcla seca y también pueden incluir los efectos de saturación en la estabilidad vertical, que determina la mezcla de una forma unidimensional. En la tabla 4 se resumen las características básicas de las opciones de esta parametrización: Medium Range Forecast Model (MRF), Yonsei University (YSU), Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) y Asymmetrical Convective Model version 2 (ACM2).

**Tabla 4.** Opciones de la parametrización de Capa Límite Planetaria

<b>Esquema</b>	<b>CLP mezclada (inestable)</b>	<b>Tratamiento de inclusión</b>	<b>Límite superior de CLP</b>
MRF	Perfil K + término contragradiante	Parte de la CLP mezclada	Desde el valor crítico del número de Richardson.
YSU	Perfil K + término contragradiante	Término explícito	Desde el perfil de flotación.
MYJ	K desde el pronóstico de Energía Cinética Turbulenta	Parte de la CLP mezclada	Desde la energía cinética de turbulencia
ACM2	Mezcla vertical hacia arriba y local K hacia abajo.	Parte de la CLP mezclada	Desde el valor crítico del número de Richardson

**Modelo de superficie – uso de suelo** – Los modelos de la superficie terrestre (LSM) utilizan la información atmosférica del esquema de capa superficial, el forzamiento radiativo del esquema de radiación, el forzante en la precipitación microfísica y esquemas de convección junto con la información interna sobre las variables de estado del suelo y las propiedades de la superficie terrestre, para proporcionar flujos de calor y de humedad sobre los puntos de la tierra y los puntos del hielo marino. Estos flujos proporcionan una condición límite inferior para el transporte vertical hecho en los esquemas de CLP (o en el régimen de difusión vertical en el caso en el que un esquema de CLP no se ejecute, como en el modo de gran turbulencia). Los modelos de la superficie terrestre tienen diversos grados de sofisticación en el tratamiento de los flujos térmicos y de humedad en capas múltiples del suelo y también pueden manejar la vegetación, raíces y efectos de dosel, así como predecir la superficie cubierta de nieve. El modelo de superficie-uso de suelo no ofrece ninguna tendencia, pero sí actualiza las variables de estado del tipo de suelo, que incluyen la temperatura del suelo, el perfil de temperatura del suelo, el perfil de humedad del suelo, la cubierta de nieve, y las propiedades de dosel. No hay interacción horizontal

entre puntos vecinos en el modelo de superficie, por lo que puede ser considerado como un modelo de columna unidimensional para cada punto en el Land Grid de WRF. Un resumen de las opciones de este modelo se muestra en la tabla 5.

**Tabla 5.** Opciones del modelo de superficie- tipo de suelo

<b>Esquema</b>	<b>Procesos de vegetación</b>	<b>Variables del tipo de suelo (número de capas)</b>	<b>Esquema de nieve</b>
5-layer thermal diffusion	No	Temperatura (5)	Ninguno
Noah	Sí	Temperatura, agua + hielo, agua (4)	1 capa, fraccional
Rapid Update Cycle (RUC)	Sí	Temperatura, hielo, agua + hielo (6)	Multicapas
Pleim-Xiu	Sí	Temperatura, humedad (2)	Solo de entrada

**Radiación** - Los esquemas de radiación proporcionan el calentamiento de la atmósfera debido a la divergencia del flujo radiativo en forma de onda larga, mientras que la radiación de onda corta es usada en el balance de calor del suelo. La radiación de onda larga incluye radiación infrarroja o térmica absorbida y emitida por los gases y superficies. El flujo de radiación de onda larga hacia la atmósfera desde el suelo está determinado por la emisividad de la superficie que a su vez depende del tipo de uso del suelo, así como de la temperatura del suelo. Respecto de la radiación de onda corta, se incluyen longitudes de onda visibles y cercanas que componen el espectro solar. Por lo tanto, la única fuente es el Sol, pero los procesos incluyen la absorción, reflexión y dispersión en la atmósfera y en las superficies.

Dentro de la atmósfera la radiación responde (opcionalmente) a las concentraciones de gases traza y a las distribuciones de vapor de agua, así como el dióxido de carbono y el ozono. Todos los esquemas usados de radiación en el WRF actualmente son esquemas de columna unidimensionales, de manera que cada columna se trata de forma independiente, y

los flujos corresponden a planos infinitos horizontales uniformes, lo que es una buena aproximación si el espesor vertical de las capas de modelo es mucho menor que la longitud horizontal de la cuadrícula. Este supuesto sería menos preciso en alta resolución horizontal. En tabla 6 se resumen las características básicas de los esquemas de radiación.

**Tabla 6.** Opciones de la parametrización de Radiación

<b>Esquema</b>	<b>Tipo de onda de emisión</b>	<b>Bandas del espectro</b>	<b>Concentración de gases tomadas en cuenta</b>
Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)	Onda larga	16	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , vapor de agua.
Eta Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)	Onda larga	14	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , vapor de agua.
NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0)	Onda larga	2	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , vapor de agua.
Eta Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)	Onda Corta	12	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , vapor de agua.
MM5 (Dudhia)	Onda Corta	1	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , vapor de agua.
Goddard	Onda Corta	11	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , vapor de agua.
CAM3 Shortwave	Onda Corta	19	CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , vapor de agua.

Es importante mencionar que las parametrizaciones físicas de WRF interactúan entre sí, algunas en ciertos pasos de tiempo como dato de entrada o de salida para un posterior tratamiento, por lo que estas interacciones son descritas en la tabla 7. Se puede observar que todos los esquemas físicos interactúan de alguna manera con la física de superficie (modelos de la superficie terrestre, y, potencialmente, los modelos oceánicos acoplados). La física de superficies, mientras que no produce de forma explícita las tendencias de las variables de estado atmosférico, es responsable de actualizar las variables de estado del suelo.

Esta información de las parametrizaciones físicas, fue obtenida de Skamarock et al., (2008).

**Tabla 7.** Interacciones entre las parametrizaciones físicas de WR. Variables de entrada (E) o salida (S) en los esquema de radiación (Rad), microfísica (MP), de parametrización de cúmulos (CP), de capa límite planetaria/difusión vertical (CLP), y la física de superficie (Spc).

	Variable del modelo	Esquema				
		Rad	MP	CP	CLP	Spc
Estado atmosférico o tendencias	Momento			E	E/S	
	Temperatura Potencial	E/S	E/S	E/S	E/S	
	Vapor de agua	E	E/S	E/S	E/S	
	Nube	E	E/S	S	E/S	
	Precipitación	E	E/S	S		
Flujos de superficie	Onda larga hacia arriba	E				S
	Onda larga hacia abajo	S				E
	Onda corta hacia arriba	E				S
	Onda corta hacia abajo	S				E
	Física de superficie para Lluvia convectiva			S		E
	Física de superficie para soluciones en Lluvia		S			E
	Flujos de calor				E	S
	Flujos de humedad				E	S
	Estrés de superficie				E	S

#### *1.4.5. Estimación de la temperatura de formación de niebla radiativa.*

Para la niebla por radiación, se propone un modelo para la estimación de la temperatura a la cual se puede formar este tipo de niebla. Labajo et al. (1995) desarrollaron un modelo que se genera a partir de una relación lineal entre la humedad relativa y la temperatura ambiente.

Este modelo consiste en expresar la temperatura de formación de niebla ( $T_f$ ) en función de la temperatura de saturación de la masa de aire ( $T_s$ ) y de un intervalo de bruma ( $\Delta T$ ), mediante la siguiente relación:

$$T_f = T_s - \Delta T \quad (1)$$

Para la temperatura de saturación es necesario considerar la humedad. Los autores consideran la definición de humedad relativa, en la forma:

$$\frac{dh}{h} = \frac{de}{e} - \frac{dE}{E} \quad (2)$$

Donde  $e$  es la presión de vapor de la masa de aire,  $h$  es humedad y  $E$  la presión de vapor de saturación. El término  $\frac{dE}{E}$  lo expresan, en función de la temperatura, mediante la ecuación de Claussius – Clapeyron:

$$\frac{dE}{E} = \frac{L}{R_v} \frac{dT}{T^2} \quad (3)$$

Siendo  $L$  (cal/g) el calor latente de vaporización,  $R_v$  (cal/gK) la constante específica para el vapor de agua y  $T$  (K) la temperatura de la masa de aire. Usando la hipótesis de trabajo de que la presión de vapor ( $e$ ) permanece constante en el intervalo en que se establecen las variaciones de humedad relativa y temperatura, la ecuación 2 se puede expresar como:

$$\frac{dh}{h} = -\frac{L}{R_v} \frac{dT}{T^2} \quad (4)$$

Labajo et al., (1991), proponen tres soluciones a esta ecuación, para lo cual consideran a  $L$  como constante, se integra la ecuación anterior, obteniendo una aproximación a la solución de la ecuación de forma exponencial, potencial y lineal. Los autores observaron que la expresión lineal es la más eficaz:

$$h_2 - h_1 = a + b (T_2 - T_1) \quad (5)$$

Donde  $h_1$  y  $h_2$  son valores de humedad relativa,  $T_1$  y  $T_2$  los valores de temperatura en los extremos de un intervalo de tiempo y los valores de los coeficientes  $a$  y  $b$ , donde Labajo et al., (1991) determinan a partir de series de variaciones trihorarias de humedad relativa y temperatura estos valores  $a$  y  $b$ :

$$h_2 - h_1 = -0.03 - 3.59 (T_2 - T_1) \quad (6)$$

Considerando que la temperatura de saturación  $T_s$  corresponde al 100% de humedad relativa y se despeja esta temperatura, se tiene una estimación de la temperatura en la que se puede formar la niebla:

$$100 - h_1 = -0.03 - 3.59 (T_s - T_1) \quad (7)$$

$$T_s = T_1 - \frac{(100 - h_1) + 0.03}{3.59} \quad (8)$$

En un día de niebla, si hay algún momento en el que se pueda haber disipado, éste se encontrará en un entorno más o menos amplio del instante en que se produce la temperatura máxima del día. Por lo tanto, se puede tomar como temperatura inicial para la aplicación del modelo la temperatura máxima inmediatamente anterior al momento de producirse la niebla ( $T_M$  en K) y el valor de humedad relativa ( $h_M$  en %) correspondiente, que deberá coincidir con el mínimo en el intervalo de pronóstico. Por lo que:

$$T_s = T_M - \frac{(100 - h_M) + 0.03}{3.59} \quad (9)$$

Retomando que, para la temperatura de formación ( $T_f = T_s - \Delta T$ ) el valor de  $\Delta T$  se calcula fijando el contenido mínimo de agua líquida de la niebla necesario para que los productos de condensación sean suficientes en tamaño y número para disminuir la visibilidad a menos de 1 km, según Tverskoi (1965), se puede establecer la disminución de la temperatura ( $\Delta T$ ) necesaria para que se condense la cantidad de vapor que constituye ese contenido de agua líquida, a partir de la definición de la humedad absoluta (a):

$$a = 217 \frac{e}{T} \quad (10)$$

La humedad absoluta (a) viene dada en  $\text{g/m}^3$  cuando la presión de vapor (e) se da hPa y la temperatura en K. Derivando logarítmicamente la ecuación 10:

$$\frac{da}{a} = \frac{de}{e} - \frac{dT}{T} \quad (11)$$

Entonces, la ecuación de Claussius-Clapeyron (ecuación 3) para la presión de vapor de saturación ( $E$ ) se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{dE}{E} = \frac{L}{R_v} \frac{dT}{T^2} = \frac{L}{R_v T} \frac{dT}{T} \quad (12)$$

En condiciones de niebla, la variación en la humedad absoluta de la masa de aire ( $\Delta a$ ) se debe al agua líquida ( $a_{liq}$ ). Entonces la ecuación 11 de la humedad absoluta (a) puede expresarse en términos de diferencias finitas, considerando la masa saturada, de donde se despeja  $da$  y se sustituye la presión de vapor de saturación (ecuación 12):

$$\Delta a = a_{liq} = a_s \left( \frac{L}{R_v T_s} - 1 \right) \frac{\Delta T}{T_s} \quad (13)$$



De esta ecuación, se despeja  $\Delta T$  entonces, y se sustituye la humedad absoluta considerada saturada,  $a_s = 217 \frac{E}{T}$

$$\Delta T = \frac{\Delta a}{217 \frac{E}{T_s^2} \left( \frac{L}{R_v T_s} - 1 \right)} \quad (14)$$

Considerando que  $L= 597$  cal/g y  $R_v = 0.1104$  cal/ gK, la ecuación anterior permite calcular la disminución de temperatura necesaria para que una niebla de radiación tenga contenido de agua líquida determinado en función de  $E$  y  $T_s$ .

De acuerdo con resultados obtenidos a partir de observaciones directas (Tverskoi, 1965), el contenido promedio de agua líquida de las nieblas de radiación oscila entre 0.3 y 0.9 g/m<sup>3</sup>. Según Moran (1944) y Byers (1973), el contenido medio de agua líquida en la masa de aire para que se den las condiciones que definen la niebla o estratos bajos, es del orden de 0.5 g/m<sup>3</sup>.

Por lo tanto, la ecuación final del modelo propuesto es:

$$T_f = T_M - \frac{(100 - h_M) + 0.03}{3.59} - \Delta T \quad (15)$$

En esta tesis se calcularon los valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  con datos observados en el AICM, utilizando la metodología del Labajo et al. (1995).

## Capítulo II

---

### **2.1. Datos**

#### **2.1.1. Datos de reanálisis**

Los datos de reanálisis son usados como condiciones iniciales para modelos de pronósticos, que alimentan a su vez a otros modelos computacionales, en los cuales los resultados se tratan por medio de análisis estadísticos globales para obtener datos de calidad, permitiendo interpolar datos y unificarlos en espacios equidistantes distribuidos en malla o de forma espectral para cada espacio de la Tierra. Este conjunto de datos es creado por asimilación de datos de observaciones sinópticas, información satelital y modelos globales (Numerical Weather Prediction; NWP).

En el presente trabajo se usaron datos de North America Regional Reanalysis (NARR) con clave ds083.2 NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, los cuales tienen información para el período 1979-presente, con sistema operacional del 2004, y cuenta con variables en tres dimensiones, sin necesidad de inicialización, con salida en 30km en la presión (niveles obligatorios), con datos de intervalo de cada 3 h y la posibilidad de desplegar 187 variables de superficie y 29 niveles en la vertical (Tomado de Web-RDA).

#### **2.1.2. METAR**

Cuyas siglas provienen del francés MÉTéorologique Aviation Régulière (METAR), es el formato estándar internacional del código utilizado para emitir informes de las observaciones meteorológicas en los aeródromos realizadas periódicamente. En México, las estaciones u oficinas meteorológicas aeronáuticas que elaboran estos informes son asignadas por la Subdirección de Meteorología de los Servicios a la Navegación en el

Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM), debiendo elaborarse, capturarse y transmitirse entre el minuto 40 y el 56 de cada hora. Sin embargo, si las condiciones atmosféricas cambian significativamente, pueden elaborarse reportes con este formato llamados SPECI. Estos datos vienen en forma codificada, lo cual es descrito en el apéndice 3.

*Ejemplo de METAR del AICM:*

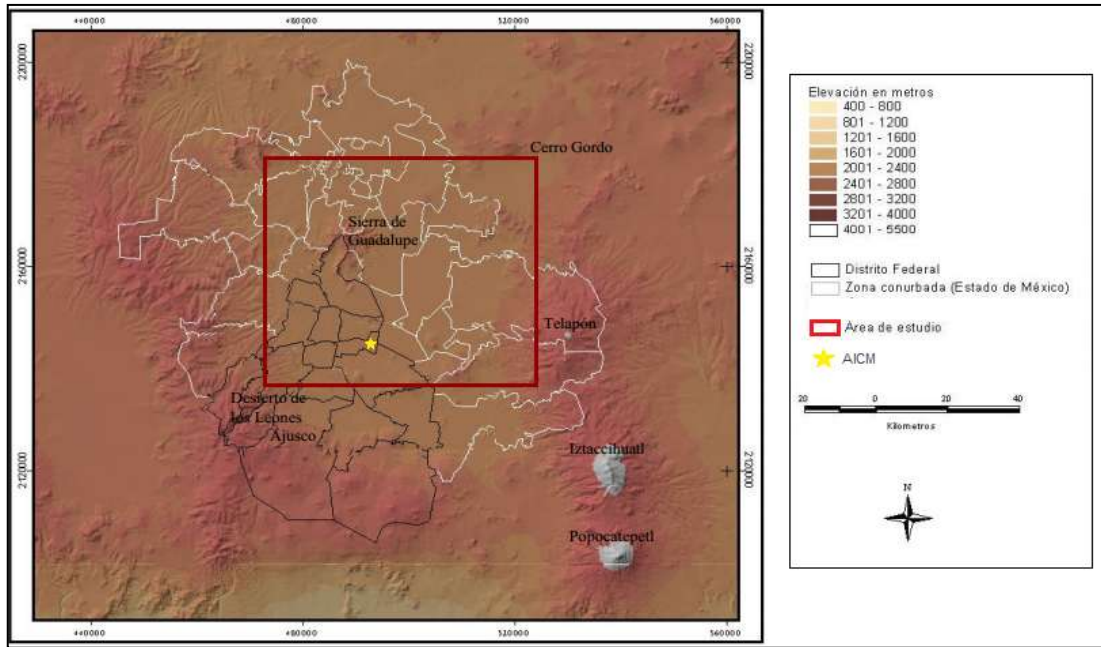
- Presencia de Niebla sobre el lugar de observación:

200912211244 METAR MMMX 211244Z 06006KT 1/8SM FG FEW080 04/03 RMK 8/030 VSBY TWR=

Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (MMMX), Fecha: 21 de Diciembre 2009 12:44Z (06:44 a. m. hora local), Viento: 60° (ENE) de 6 kt (3.08 m/s), Visibilidad de 1/8 de milla (201.17m), presencia de Niebla en el lugar de observación, Cantidad de nubosidad: de 1/8 - 2/8 octas (FEW) con altura de la base de la nube más baja de 8000 ft (2,438.4m), Temperatura ambiente de 04°C y Temperatura de Punto de Rocío de 03°C, Nubes: Medias del tipo Altocumulus Translucidos y visibilidad de torre.

## ***2.2. Región de estudio***

La región de estudio se localiza en la parte noreste del Distrito Federal y el Estado de México, siendo como punto central de interés el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) “Benito Juárez”. Está contenida en la Cuenca de México, la cual se ubica en la región Lagos y Volcanes del Anáhuac de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico. Esta cuenca está rodeado, por las sierras de Monte Alto, Monte Bajo, Las Cruces, Pachuca, así como la Sierra Nevada y la serranía de Chichinauhtzin; esta última área fue originalmente ocupada por el Lago de Texcoco, el mayor de un sistema de lagos interconectados en la cuenca que han sido drenado sistemáticamente desde la época colonial durante los últimos cuatrocientos años, de lo cual queda una pequeña porción (García - García & Zarraluqui, 2008) (Figura 12b).



**Figura 10.** Región de estudio

La cuenca contiene valles intermontañosos, mesetas y cañadas, así como terrenos semiplanos (Ramírez et al., 2001).

También se encuentran prominencias topográficas como las sierras donde se ubican el Ajusco (3930 m.s.n.m.), el Desierto de los Leones, el volcán Tláloc y la Sierra de Guadalupe, entre otros (Figura 10); así como algunos de los picos más altos del país, como el Popocatepetl (5462 m. s. n. m.) y el Iztaccíhuatl (5286 m. s. n. m.), excepto en el noreste.

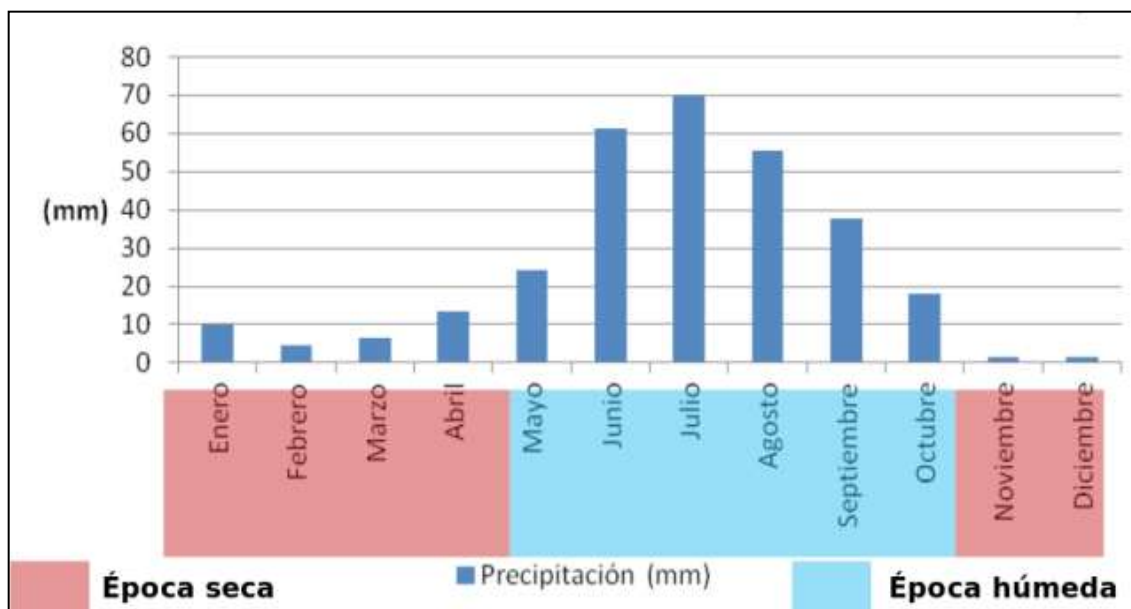
Los sistemas meteorológicos predominantes en esta región son los sistemas frontales (septiembre a mayo regularmente) y los sistemas tropicales (mayo a noviembre). Sin embargo, al encontrarse en la parte central de la República Mexicana, esta región también está influenciada por el ingreso de humedad de ambos océanos que rodean al país.

Es por ello que se pueden diferenciar dos épocas climáticas en términos de precipitación, como se muestra en la Figura 11: una época seca y otra húmeda. La época de “lluvias” de junio a octubre, está caracterizada por aire marítimo tropical con alto contenido de humedad; y la época de “seca” que se caracteriza por una menor cantidad de precipitación

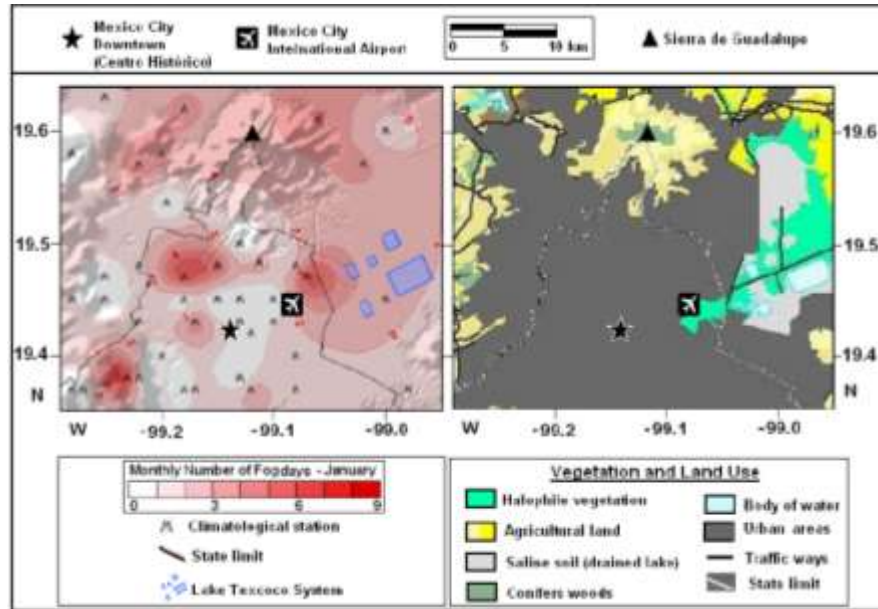
que proviene de masas de aire polar continental o de tipo polar-modificado continental, impulsadas por sistemas frontales principalmente.

La cuenca de México es una región que presenta eventos de niebla en diversos días del año. Según estudios realizados por otros autores, se conoce que el número promedio de episodios de niebla desde 7 días al mes, excepto en verano y principios de otoño (junio a septiembre) cuando la cantidad mensual máxima es de hasta 12 días al mes (figura 12a) (García-García & Zarraluqui, 2008).

En la figura 12, se muestra los promedio de días con niebla del mes enero y el uso de suelo de una parte del Distrito Federal y sus alrededores en el Estado de México, en la cual se puede observar que el mayor número de días con niebla está cerca o sobre las áreas no conurbadas, donde se encuentran fuentes de humedad local para la formación de niebla como el lago de Texcoco, áreas agrícolas y áreas de vegetación.



**Figura 11.** Climatología de precipitación para el Valle de México (1981-2010, SMN).



**Figura 12.** a) Climatología de niebla en la Cuenca de México (izquierda): promedio de días con niebla en enero. b) Cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca de México (panel derecho). Imagen tomada de García-García & Zarraluqui, (2008).

### *2.2.1. El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM)*

Se encuentra ubicado a  $19^{\circ}26'07''$  de latitud Norte y a  $99^{\circ}04'20''$  de longitud Oeste, con una altitud de 2,237 m.s.n.m en el Distrito Federal, con dirección en Av. Capitán Carlos León s/n. Col. Peñón de los baños, CP 15620. Delegación Venustiano Carranza, México Distrito Federal. Cuenta con una superficie de 746.43 ha, con horario de operación las 24 horas. Es un aeropuerto categoría 9 (Aviones de 61 a 76 metros de largo y 7 metros de ancho del fuselaje, la escala más alta de acuerdo con la Organización de Aviación Civil Internacional, OACI); y se encuentra en operación desde que el 28 de junio de 1952 fue inaugurado (Herrera et al., 2005).

Este aeropuerto cuenta con el 35% de las operaciones aéreas que se realizan en el territorio nacional, teniendo 54 operaciones por hora en promedio. Los mayores aviones operables son: B747-400, B 777-300 (pasajeros), ANTONOV 124-100 (carga), C-5 y C-141 (militar). Cuenta con dos pistas: 5R (derecha) - 23 L (izquierda) de 3,985 m x 45 m; y 5L (izquierda)

- 23 R (derecha) de 3,963m x 45 m, orientadas a 52° y 232° del norte magnético, respectivamente, y con una pista auxiliar (Azpiri et al., 2007).

A través del AICM, la capital de la República Mexicana se une con 50 ciudades del país y 40 del extranjero: 17 en Estados Unidos, 4 en Canadá, 6 en Europa, 5 en países centroamericanos y del Caribe, 7 en Sudamérica y dos en Asia. El AICM atiende a más de 26 millones de pasajeros al año, por lo que es el principal aeropuerto metropolitano de Latinoamérica.

## Capítulo III

---

### *3.1. Metodología*

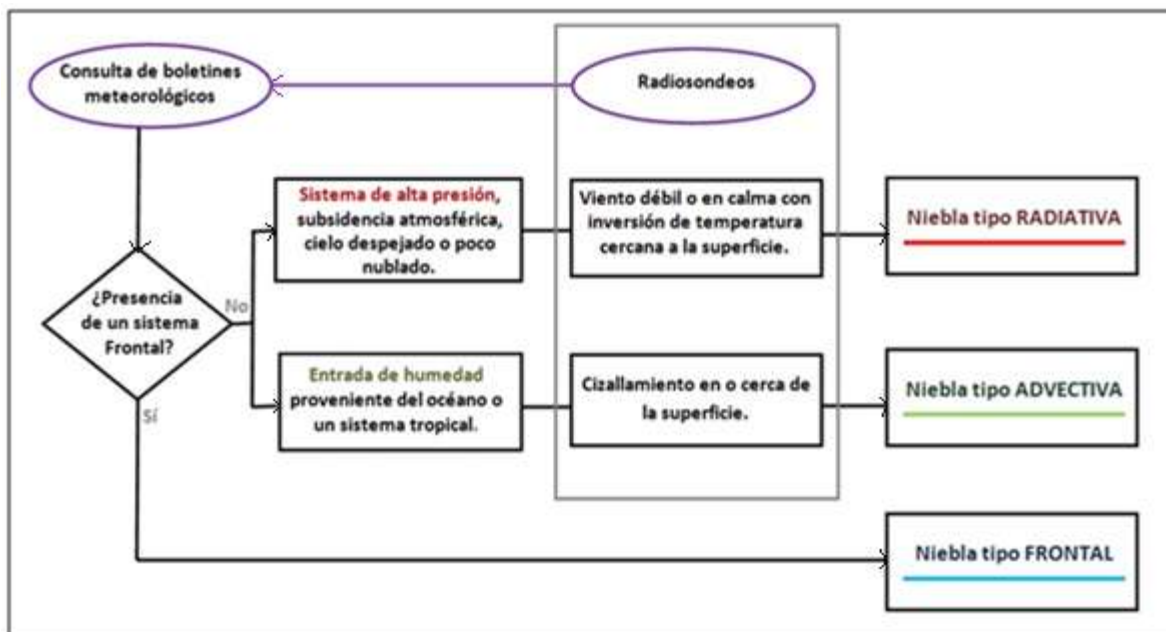
#### *3.1.1. Caracterización de los Eventos de Niebla*

Para caracterizar los eventos de niebla en la región del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), se analizaron datos sobre el aeropuerto y en una región de 30 km. a su alrededor. Los datos analizados sobre el aeropuerto fueron datos METAR (METeorological Aerodrome Report) y de radiosondeos. Para la región seleccionada, también se usaron estaciones meteorológicas cercanas al aeropuerto y boletines meteorológicos.

Para conocer en qué días y a qué hora se presentaron eventos de niebla en diez años (2003 – 2012) se usaron los datos de METAR, los cuales son datos de aeropuertos comerciales codificados (ver apéndice 3). Los METARs reportan mediciones meteorológicas e

información de fenómenos meteorológicos visibles. Así, se construyeron tablas con las variables meteorológicas reportadas seis horas antes del primer reporte de cada evento de niebla y durante y hasta su disipación.

Como se mencionó, existe la clasificación de tipos de niebla por el mecanismo de formación: por radiación, por advección y por sistema frontal. Para definir qué tipo de niebla es cada evento reportado en el periodo seleccionado, se realizó la metodología mostrada en la figura 13. Primeramente, del boletín meteorológico se observaban los fenómenos descritos presentes sobre la región de interés y su evolución, así como características típicas descritas anteriormente según el tipo de niebla. Otra parte importante que se tomó del boletín meteorológico fue de dónde proviene la fuente de humedad para el evento de niebla, como primera aproximación.



**Figura 13.** Metodología para la clasificación de los eventos de niebla en el AICM

Aunado a esto se consultó el radiosondeo de la Ciudad de México el cual, a partir de marzo del 1998, se realiza en el Observatorio de Tacubaya, localizado a una distancia de 12 km en línea recta del AICM, aunque en estos años no en todos los eventos reportados por METAR se muestran claramente las características de niebla en los radiosondeos de Tacubaya



debido a la distancia, para los casos que no presentan las características descritas en el radiosondeo sólo se tomó en cuenta el boletín meteorológico. Del radiosondeo, aparte de características descritas en la figura 13, para el análisis de las características seis horas antes del evento y durante, se analizó el espesor de la capa de niebla, la altura de la inversión térmica y Nivel de Condensación por Ascenso (NCA).

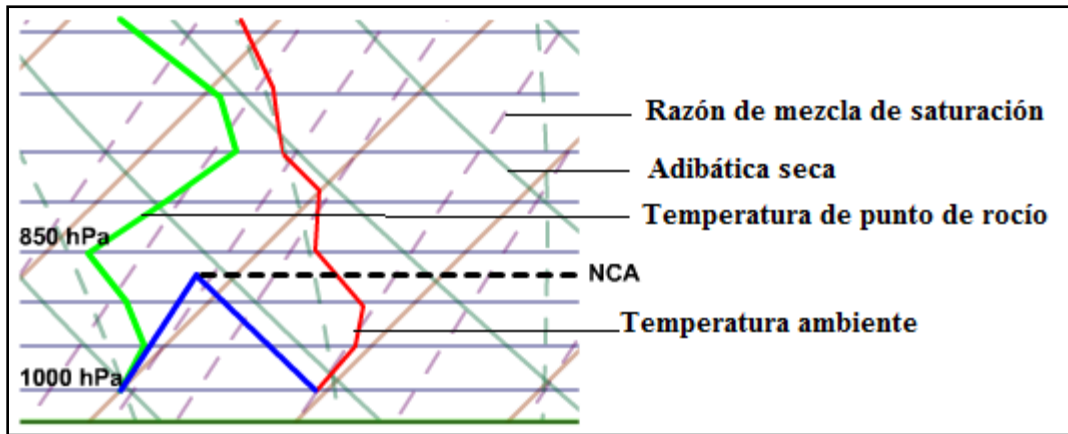
Para la estimación del espesor de la capa de niebla en un radiosondeo, se promedió la razón de mezcla en superficie con la razón de mezcla en el tope de la inversión térmica; con este valor se ubica la línea de razón de mezcla subiendo hasta que se intercepte con la línea de temperatura ambiente, por lo que en ese punto es una buena estimación del tope de la capa de niebla. Es importante observar en los datos los valores de humedad, los cuales muestran donde existen valores altos de ésta, siendo un indicativo de posible formación de niebla.

Del mismo modo, una estimación de la temperatura a la que se puede disipar la niebla se calcula a partir de una adiabática seca, desde de la intersección de la relación de mezcla promedio y la línea de temperatura hasta el nivel de superficie. La temperatura de la adiabática seca en superficie es la temperatura necesaria para una disipación completa y es conocida por el nombre de "temperatura crítica".

El NCA, que es la altura a la que una parcela de aire se satura cuando asciende siguiendo un proceso adiabático seco, se localiza en un radiosondeo en la intersección de la línea de razón de mezcla de saturación que pasa por la temperatura de punto de rocío en la superficie, con la línea de la adiabática seca que atraviesa la temperatura de la superficie (Figura 14)<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup>[http://www.met.ed.ucar.edu/mesoprim/skewt\\_es/dry\\_adiabat.htm](http://www.met.ed.ucar.edu/mesoprim/skewt_es/dry_adiabat.htm)



**Figura 14.** Cálculo de Nivel de Condensación por Ascenso (NCA) en un radiosondeo.

Una vez obtenidos los valores típicos según cada tipo de niebla, estos valores se buscaron en las estaciones meteorológicas durante las horas que los METARs reportaron niebla. Dado que dichas estaciones, al no reportar fenómenos meteorológicos presentes, una primera aproximación del área que cubre el evento de niebla se basa en que exista una depresión de temperatura cercana a cero, viento débil, humedad relativa alta y ausencia de precipitación.

### 3.2.2. Modelación

Se eligieron casos ‘típicos’ de cada tipo de niebla y los casos de mayor duración para trabajarse con el modelo WRF en la región de estudio. En WRF se usaron tres dominios (Figura 15) para cada modelación, con la configuración mostrada en la tabla 8. Aunque el área de interés es la cuenca de México y particularmente el AICM, para el modelo WRF se necesita un dominio madre (dominio de menor resolución) ya que es un modelo de malla de área limitada el cual es unidireccional que resuelve las ecuaciones para cada punto de malla con los datos proporcionados, por lo que se necesita en el primer dominio una resolución baja para estabilizar dichas ecuaciones y así alimentar los dominios de mayor resolución resolviendo las mismas ecuaciones e interpolando así los valores para áreas más pequeñas. También se hicieron diversos experimentos con combinaciones de parametrizaciones físicas de WRF, las cuales son discutidas en los resultados. Dado que la niebla es un fenómeno de escala local, y en algunas ocasiones de mesoescala debido al área que cubre el

evento, es importante trabajar con parametrizaciones que permitan darle prioridad a las condiciones de dichas escalas para su formación. Sin embargo, ciertos eventos de niebla también son afectados por sistemas de mayor escala, como frentes fríos, sin mencionar que en la meteorología la interacción de fenómenos de diferentes escalas contribuye al desarrollo de ciertos fenómenos que, para el caso de la niebla, representan una fuente de humedad. Por lo tanto, se usaron diferentes combinaciones de parametrizaciones físicas (tabla 9), así como diferentes pasos de tiempo con el objetivo de estabilizar el modelo. El resto de la configuración completa de las opciones del “namelist” se muestra en el apéndice 2.

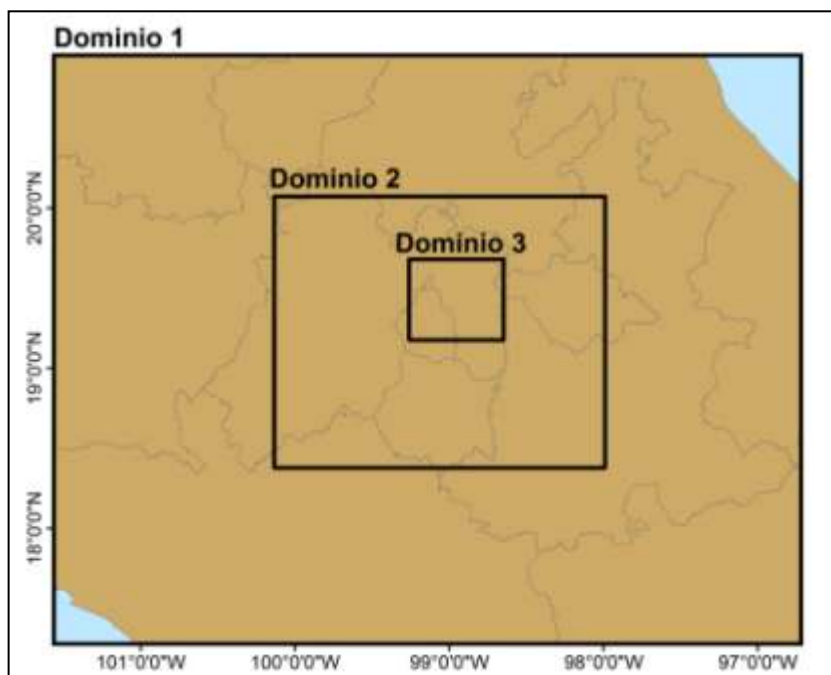
**Tabla 8.** Configuración de los dominios

Número de dominios:	3
Resolución:	27 km, 9 km, 3 km.
Número de puntos:	e_we = 74, 112, 94, e_sn = 61, 97, 91,
Niveles en la vertical:	35 niveles.
Uso de suelo:	Modificado

**Tabla 9.** Combinaciones utilizadas de las parametrizaciones físicas en WRF

Combinación	Microfísica (mp_physics)	Capa Límite Planetaria (bl_pbl_physics)	Física de Superficie (sf_surface_physics)	Superficie por capa (sf_sfclay_physics)
1	WSM3	YSU	TERMAL	MM5 Monin-Obukhov
2	WSM5	MYJ	NOAH	Monin-Obukhov (Janjic Eta)
3	WSM3	YSU	NOAH	MM5 Monin-Obukhov
4	FERRIER	YSU	NOAH	MM5 Monin-Obukhov
5	WSM3	MYJ	NOAH	Monin-Obukhov (Janjic Eta)
6	WSM5	MYJ	TERMAL	Monin-Obukhov (Janjic Eta)
7	Kessler	MYJ	TERMAL	Monin-Obukhov (Janjic Eta)
8	Kessler	MYJ	NOAH	Monin-Obukhov (Janjic Eta)
9	Kessler	MYJ	NOAH	Monin-Obukhov (Janjic Eta)

Por lo tanto, al no ser la niebla un fenómeno de gran escala en la región, se dio prioridad a los elementos de escala local dentro del modelo WRF, para lo cual se modificó el uso de suelo que tiene configurado el modelo por el uso de suelo que reporta INEGI en el año 2010 en la zona de interés. Para los valores bases, se utilizaron las categorías de uso de suelo USGS 24 (Apéndice 1).



**Figura 15.** Dominios configurados en WRF.

### ***3.2.3. Estimación de la temperatura de formación de niebla radiativa para el AICM***

Con el objetivo de estimar a qué temperatura se puede formar la niebla radiativa, se tomó como base la investigación de Labajo et al. (1995), esto debido a que los resultados con el modelo WRF para niebla radiativa sobre el AICM fueron los menos favorables en cuanto a las tendencias de temperatura. Por lo que, se tomó como base la fórmula propuesta por Labajo et al. (1995), para la temperatura de formación de niebla radiativa:

$$T_f = T_M - \frac{(100 - h_M) + a}{b} - \Delta T$$

En el modelo original de Labajo et al., (1995), los coeficientes  $a$  y  $b$  son obtenidos de regresiones lineales de datos observados a las 07:00 UTC (+ 2 h o 1 h para la hora local de Salamanca, España, la cual es la hora alrededor del máximo de humedad y mínimo de temperatura generalmente) durante todo un año (1998). Sin embargo, en este trabajo estos coeficientes se calcularon con los datos del AICM solamente para los días que hubo niebla radiativa y a la hora del primer reporte de niebla con los datos de temperatura y humedad.

También, en el modelo original se calcula la disminución de temperatura ( $\Delta T$ ) necesaria para que los productos de condensación sean suficientes en tamaño y número para disminuir la visibilidad hasta valores menores de 1 km, por lo que en esta investigación se tomó esta diferencia de temperatura como la depresión de temperatura observada en el momento que se reportó la niebla.

Cabe recordar que dentro de la hipótesis de este modelo, la presión de vapor,  $e$ , medida en el punto de observación se debe mantener casi constante, por lo tanto el intervalo de tiempo se toma de tres horas antes del evento (como sugieren Labajo, et al., 1995) y seis horas previas al evento para observar si existe un cambio significativo en esta estimación.

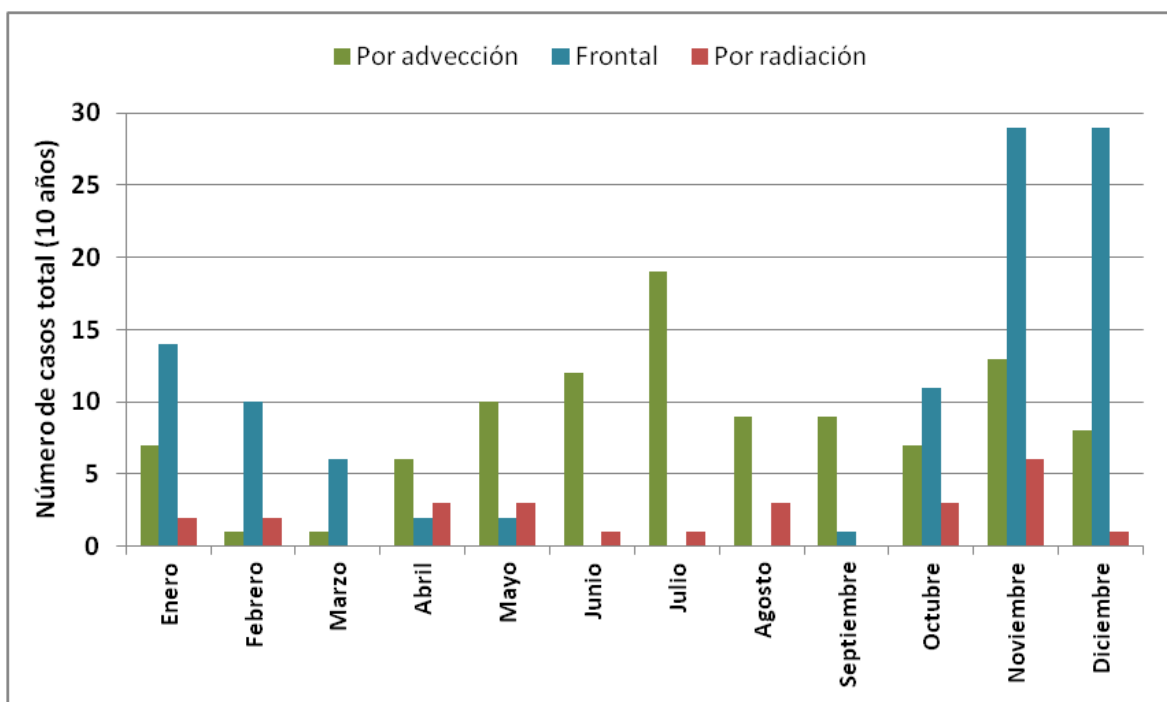
Una vez obtenido el mejor ajuste, se probó esta fórmula en los días de niebla. Así, la validez de dicho modelo para el AICM se comprobó comparando los resultados con datos observados.

## Capítulo VI

### 4.1. Resultados

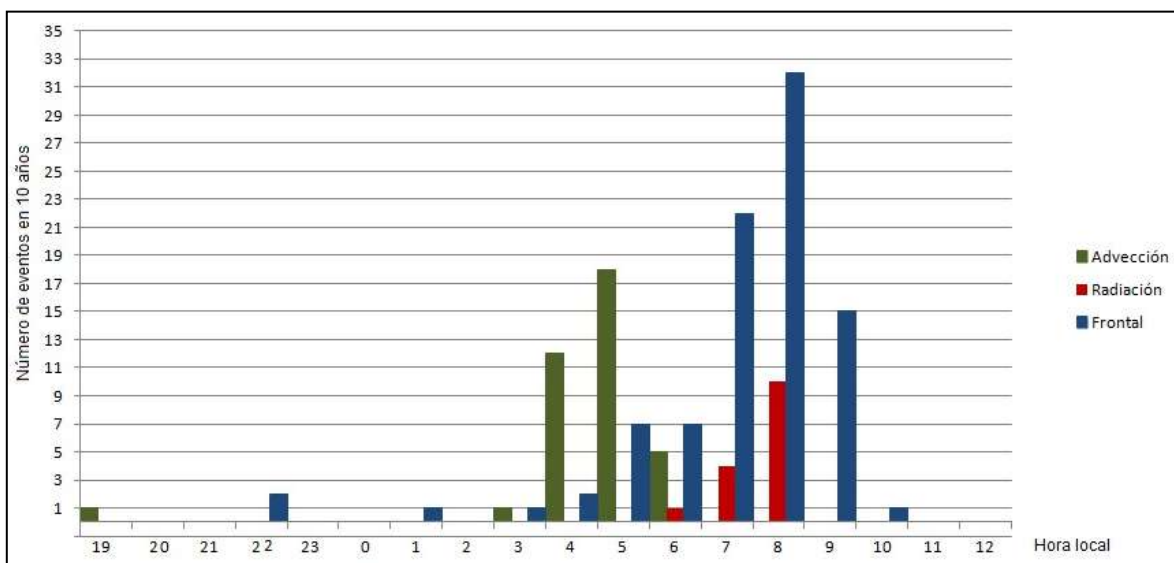
#### 4.1.1. Caracterización y una climatología de niebla

Con el análisis de 10 años de datos METAR, se obtuvo la siguiente caracterización de los eventos de niebla sobre el AICM (Figura 16). Los eventos de niebla se observan durante todo el año, dentro de los cuales el tipo de niebla advectiva está presente en cada mes, teniendo un máximo de eventos en el mes de julio, mes de mayor precipitación en la región. De septiembre a junio, el paso de los sistemas frontales repercute en la formación de eventos de niebla, siendo la niebla frontal el tipo dominante en esa temporada, presentando máximos de este tipo de casos en los meses de noviembre y diciembre. Los eventos de menor incidencia en el año es el tipo radiativa.

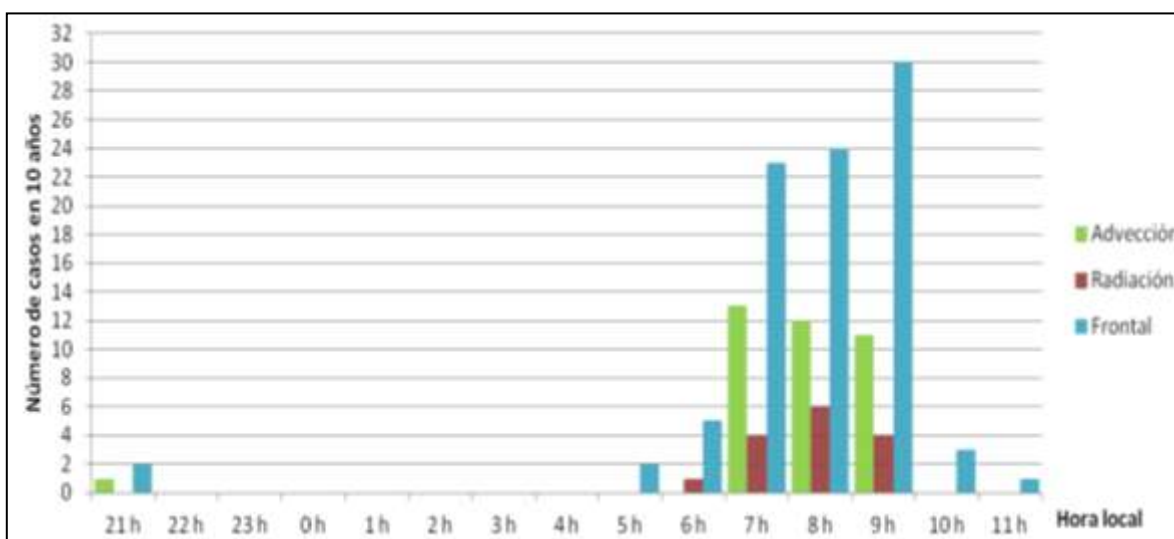


**Figura 16.** Eventos de niebla en el periodo 2003 – 2012 reportados por METAR en el AICM

Las horas típicas de formación de niebla sobre el AICM están entre las 04:00 y las 10:00 (hora local), la niebla de tipo de advectiva se forma con mayor frecuencia entre las 04:00 y las 05:00 horas, mientras que la niebla de tipo frontal se forma regularmente alrededor de las 08:00 a. m. También la niebla radiativa tiene una mayor incidencia en esta hora (Figura 17). Generalmente, la niebla en el AICM se disipa antes del medio día, con mayor frecuencia entre las 07:00 y 09:00 a. m. (Figura 18).

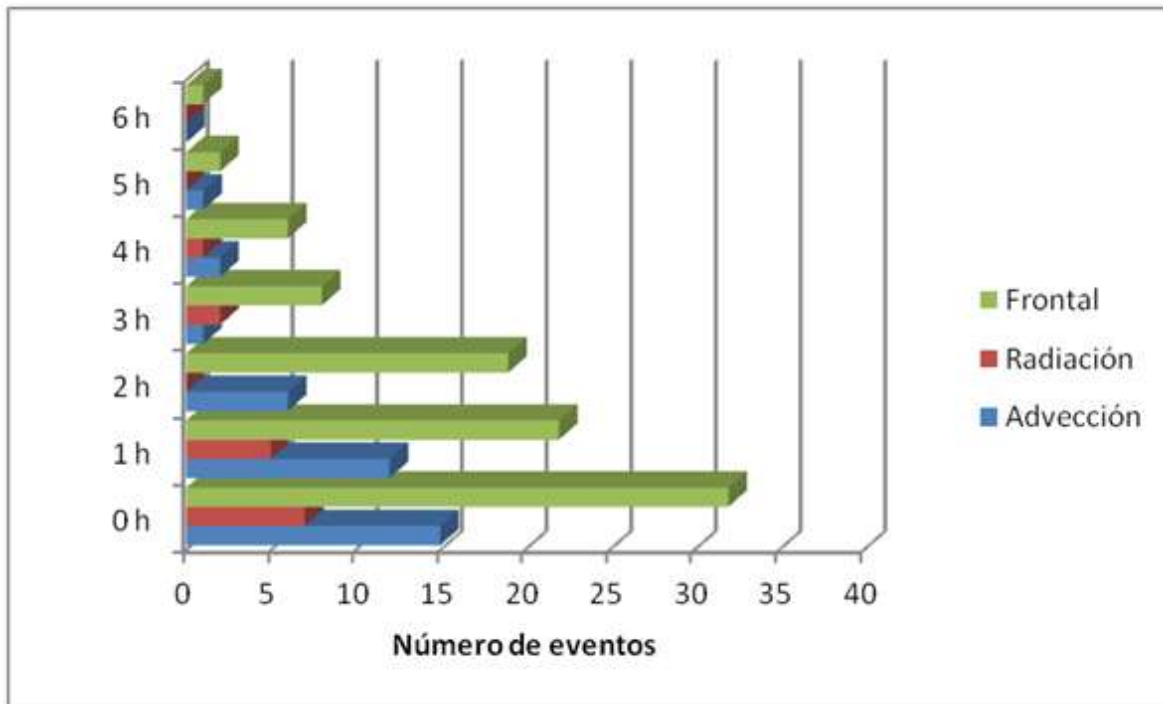


**Figura 17.** Hora de formación de los eventos de niebla



**Figura 18.** Hora de disipación de los eventos de niebla

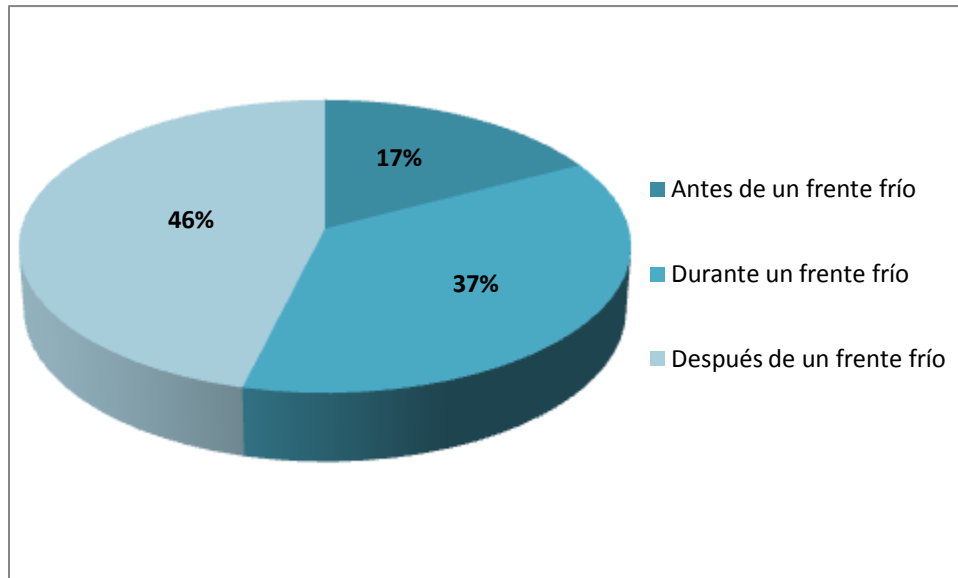
La mayoría de los eventos de niebla reportados en o visiblemente cerca del AICM tienen una duración menor a dos horas, predominando en las observaciones un 65% eventos con duración menor o igual a una hora. Cabe destacar que entre los casos de mayor persistencia en la niebla de tipo frontal se registraron eventos de hasta 6 horas de duración (Figura 19).



**Figura 19.** Duración de los eventos de niebla

Dentro del tipo de niebla frontal la mayoría de los eventos de niebla ocurren después del paso de un frente frío y durante éste, teniendo un porcentaje de 46% y 37 %, respectivamente, de todos los eventos de este tipo (figura 20). Antes de un frente frío, la probabilidad de un evento de niebla es menor debido a la dinámica del frente frío ya que, al avanzar la masa de aire fría y más seca que la masa de aire caliente desplazada, provoca regularmente condiciones para nubes convectivas debido al ascenso forzado de la masa de aire caliente.





**Figura 20.** Porcentaje del tipo de niebla frontal

Otra parte de esta caracterización consistió en obtener los rangos de temperatura, humedad y viento para la formación de niebla. Es importante resaltar que, para cualquier tipo de niebla, el viento debe ser débil o en calma al menos una hora previa al evento y durante el evento (Tabla 10). De esta manera, se da la formación de la capa estable cercana a la superficie y la inversión térmica que contribuye a la formación y duración del evento, así como la presencia de humedad alta para que pueda haber sobresaturación y, por lo tanto, condensación. El caso de excepción a esto es la niebla advectiva, como se puede observar en la tabla 10, ya que en la época seca la humedad en el lugar de interés puede ser baja, por lo que la humedad necesaria para la formación de niebla puede ser “advectada” desde otro lugar con viento moderado. Sin embargo los datos muestran que, cuando la niebla ya está formada, la rapidez del viento no excede los 3 m/s para cualquier tipo de niebla.

**Tabla 10.** Valores de temperatura, viento y humedad una hora antes de la formación de un evento de niebla sobre el AICM.

Época	TIPO	Variables meteorológicas		
		Razón típica de depresión de temperatura	Viento	Humedad Relativa
Húmeda (May – Oct)	<b>Por advección</b>	Menor que 5°C	Menor que 9 m/s	Mayor que 70%
	<b>Prefrontal</b>	Menor que 4°C	Menor que 7 m/s	Mayor que 80%
	<b>Frontal</b>	Menor o igual que 3°C	Menor que 4 m/s	
	<b>Posfrontal</b>	Menor o igual que 3°C	Menor que 4 m/s	
	<b>Por radiación</b>	Menor o igual que 4°C	Menor que 5 m/s	Mayor que 75%
Seca (Nov– Abr)	<b>Por advección</b>	Menor o igual que 12°C	Menor que 6 m/s	Variable
	<b>Prefrontal</b>	Menor que 8°C	Menor que 6 m/s	Mayor que 60%
	<b>Frontal</b>	Menor que 5°C	Menor que 5 m/s	
	<b>Posfrontal</b>	Menor o igual que 5°C	Menor que 4 m/s	
	<b>Por radiación</b>	Menor o igual que 7°C	Menor que 4 m/s	Mayor que 65%

#### **4.1.2. Condiciones previas al evento de niebla**

En cuanto al análisis de los datos seis horas previas al evento sobre el AICM, se obtuvieron tendencias de humedad y temperatura para cada tipo de niebla y época (húmeda o seca respecto a precipitación). Para ello, se eligieron los casos ‘típicos’ de cada tipo de niebla, tomándose como aquéllos que tienen características similares en cuanto a duración, hora de formación y rangos de temperatura, humedad y viento durante la formación, los cuales sobrepasan el 80% para los eventos de tipos frontal y radiativo, y el 75% para los de tipo advectivo.

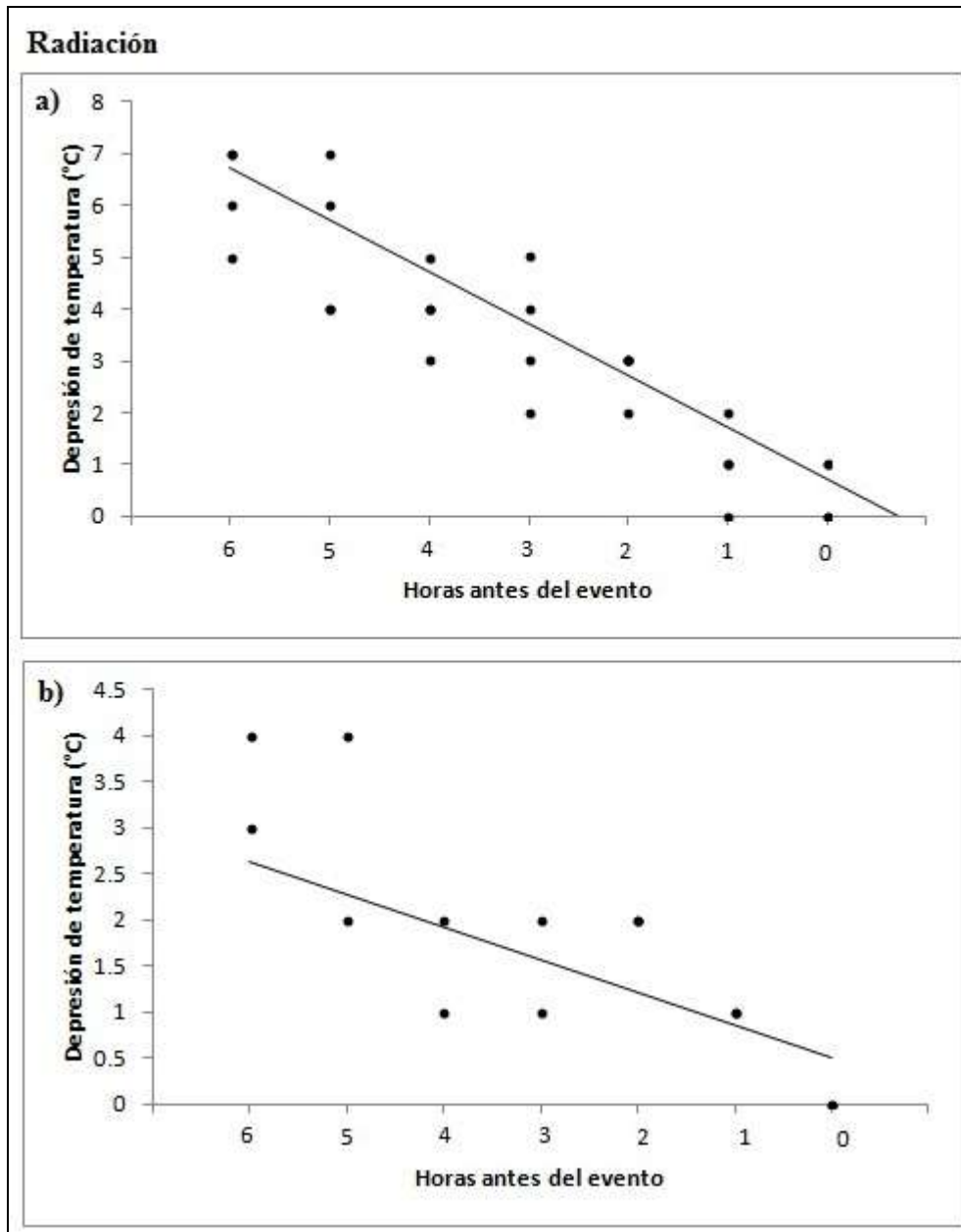
Como se sabe, la depresión de temperatura es la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de punto de rocío, por lo que es un indicador de la variación de la temperatura y la humedad atmosférica; y un valor de depresión de temperatura igual a

cero corresponde a un 100% de humedad relativa. Así, las siguientes tendencias analizadas en los gráficos hacen referencia a la depresión de temperatura ambiente.

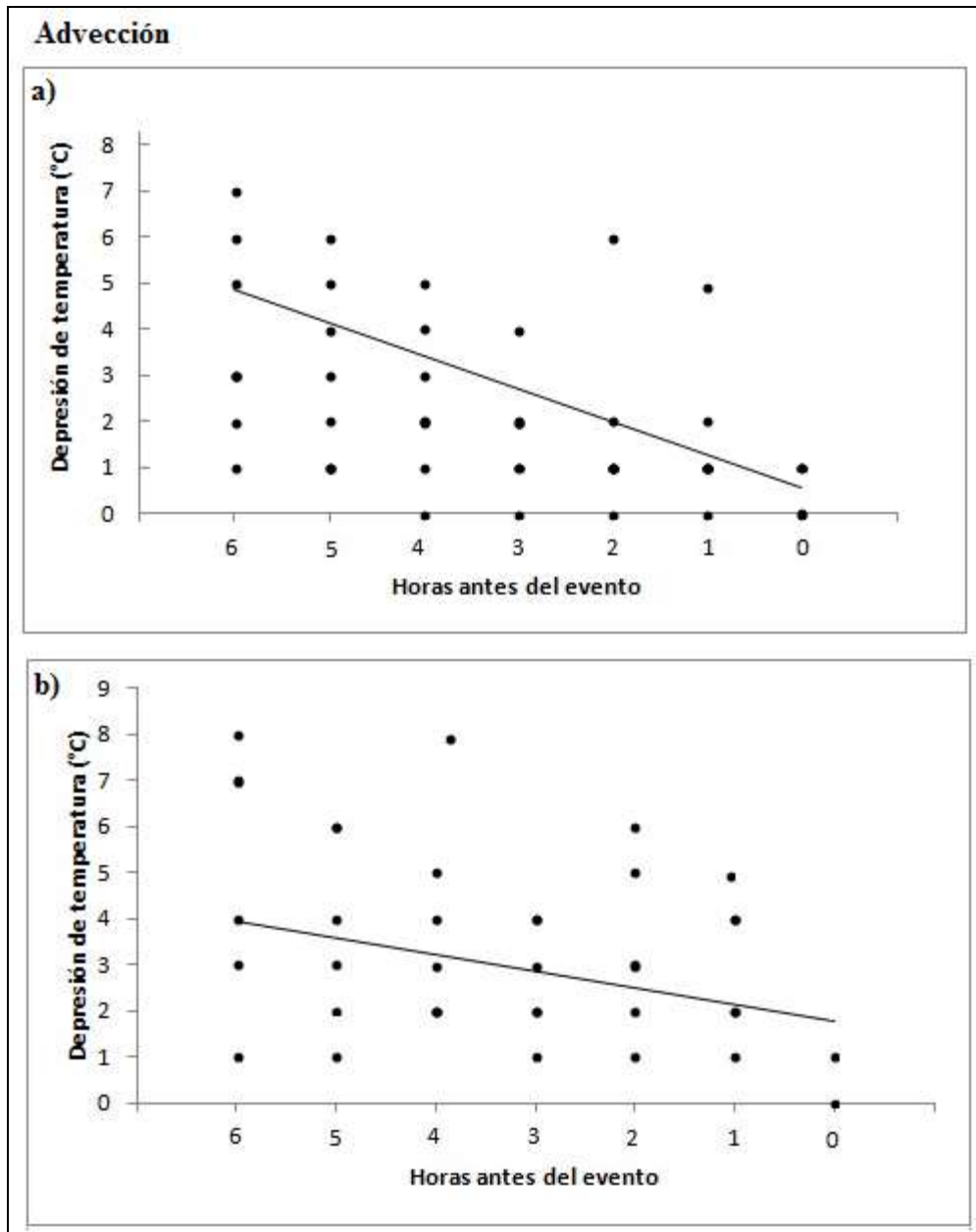
Para la niebla radiativa se observó que para la época seca, la máxima depresión de temperatura seis horas previas al evento, tiene una tendencia máxima de disminuir  $7^{\circ}\text{C}$  en 6 horas (Figura 21a), sin embargo para la época de mayor precipitación la tendencia máxima de la depresión de temperatura es de aproximadamente  $4^{\circ}\text{C}$  en 6 horas (Figura 21b). Esto puede ser explicado debido a que, para la niebla de tipo radiativo, se requiere de un enfriamiento previo, lo que provoca que en la época de mayor precipitación exista una mayor humedad en el ambiente y que este enfriamiento radiativo sea menos marcado, ya que existe la humedad necesaria para la formación de niebla. Por lo tanto, la temperatura ambiente y la temperatura del punto de rocío tienen valores cercanos entre sí.

La máxima tendencia en el caso de niebla radiativa seis horas previas al evento es de  $7^{\circ}\text{C}$  y  $8^{\circ}\text{C}$  en 6 horas previas al evento, para la época seca y húmeda, respectivamente (Figura 22), aunque para este tipo de niebla la tendencia decreciente no siempre es marcada, ya que en estos casos puede existir un aumento en la diferencia de temperatura ambiente y la temperatura de punto de rocío debido a que en la niebla de tipo advectivo se forma con el arrastre de humedad de otro lugar por el viento.

Respecto a la niebla de tipo frontal, estos casos suceden prácticamente durante la temporada de menor precipitación para la región (temporada de frentes fríos), por lo que los gráficos mostrados en la figura muestran sólo la época seca. La tendencia de la depresión de temperatura seis horas previas a la niebla tiene un comportamiento distinto antes de la llegada del sistema frontal y durante éste (Figura 23 a y b). Se puede observar que antes de un frente frío, la depresión de temperatura puede ser de hasta  $9^{\circ}\text{C}$  seis horas previas a la formación de niebla y durante el paso del frente frío; la depresión de temperatura se puede mantener constante en algunos casos, teniendo su máxima tendencia de  $3^{\circ}\text{C}$  en seis horas.



**Figura 21.** Tendencia de la depresión de temperatura para los casos ‘típicos’ de **niebla radiativa** **a)** época de menor precipitación (noviembre a abril), **b)** época de mayor precipitación (mayo a octubre) para la región de la Cuenca de México.

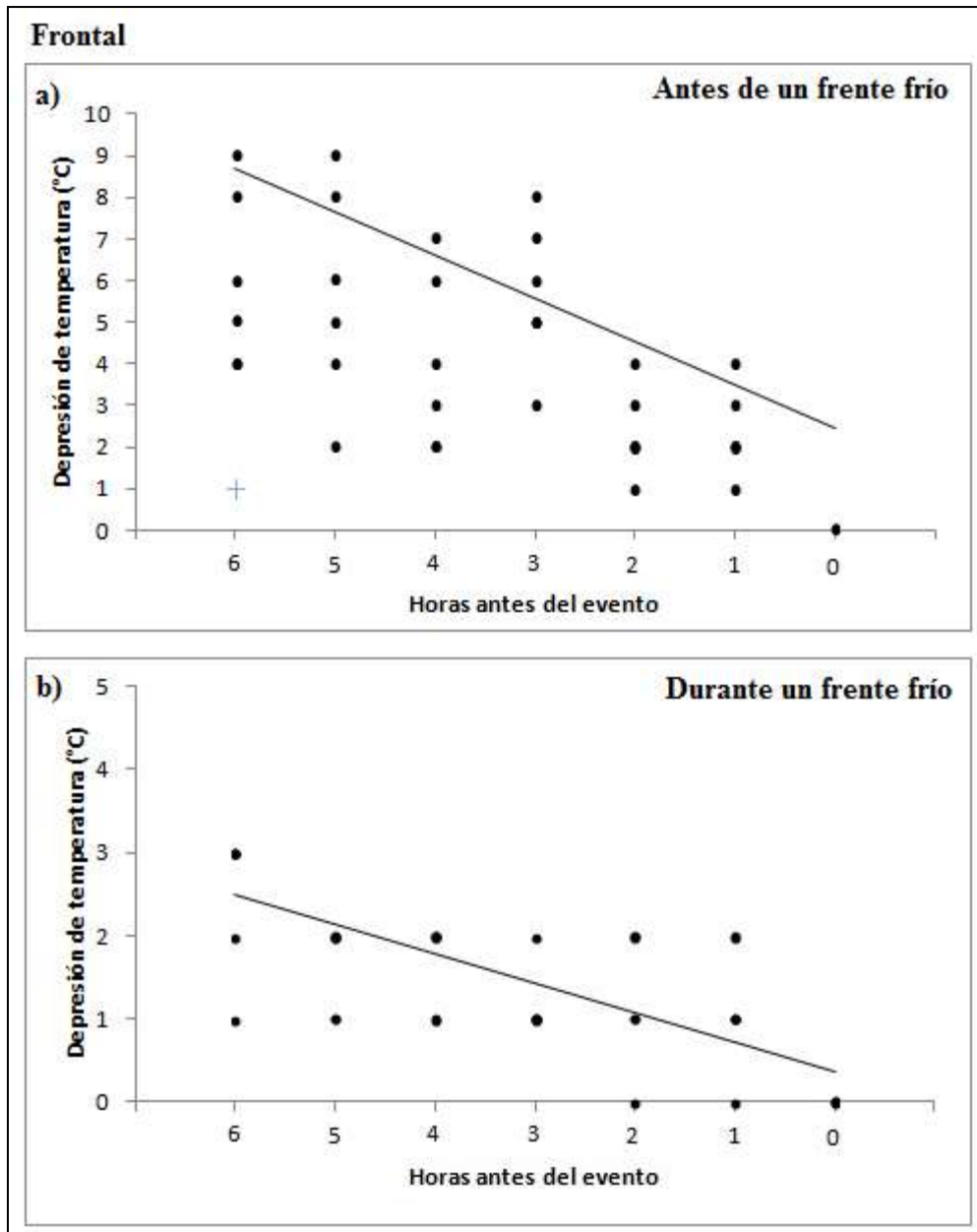


**Figura 22.** Tendencia de la depresión de temperatura para los casos ‘típicos’ de **niebla advectiva** **a)** época de menor precipitación (noviembre a abril), **b)** época de mayor precipitación (mayo a octubre) para la región de la Cuenca de México.

El tipo de niebla frontal comparte algunas similitudes con la niebla de tipo advectiva, como por ejemplo que no siempre antes de un frente frío se observa una tendencia a disminuir la depresión de temperatura. Esto es debido a la masa de aire más seca y caliente que es desplazada por la masa más fría durante un frente frío, lo que conlleva un tipo de

advección. Sin embargo, en la clasificación utilizada en esta investigación, se hace la diferencia por el tipo de fenómeno que genera la niebla, s decir, un frente frío.

Del mismo modo, para la niebla de tipos advectivo y frontal, se observaron descensos de temperatura ambiente de hasta 11°C en seis horas previas al evento.



**Figura 23.** Tendencia de la depresión de temperatura para los casos ‘típicos’ de **niebla frontal** para la época de menor precipitación para la región de la Cuenca de México **a)** antes un frente frío **b)** durante un frente frío.

### *4.1.3. Estimaciones con radiosondeo*

Una vez identificado qué día hubo niebla en el AICM, se analizaron la mayoría de estos días con datos de radiosondeos. Sin embargo, cabe aclarar que desde marzo de 1998 el radiosondeo que se hacía en el AICM se trasladó al Observatorio de Tacubaya. Así, para el período de observación del presente (2003 a 2012), se observó que no en todos los casos reportados en el AICM se muestran en el radiosondeo las características de un evento de niebla descritas anteriormente. Lo cual se puede explicar por la distancia que existe entre el observatorio y el aeropuerto (aproximadamente 12 km en línea recta) y las horas de realización de radiosondeos, (a las 00:00 y 12:00Z), pues la mayoría de los eventos comienzan alrededor de las 06:00 a.m. (hora local). Por ello, para este análisis se utilizó radiosondeo de las 12:00Z en la mayoría de los casos.

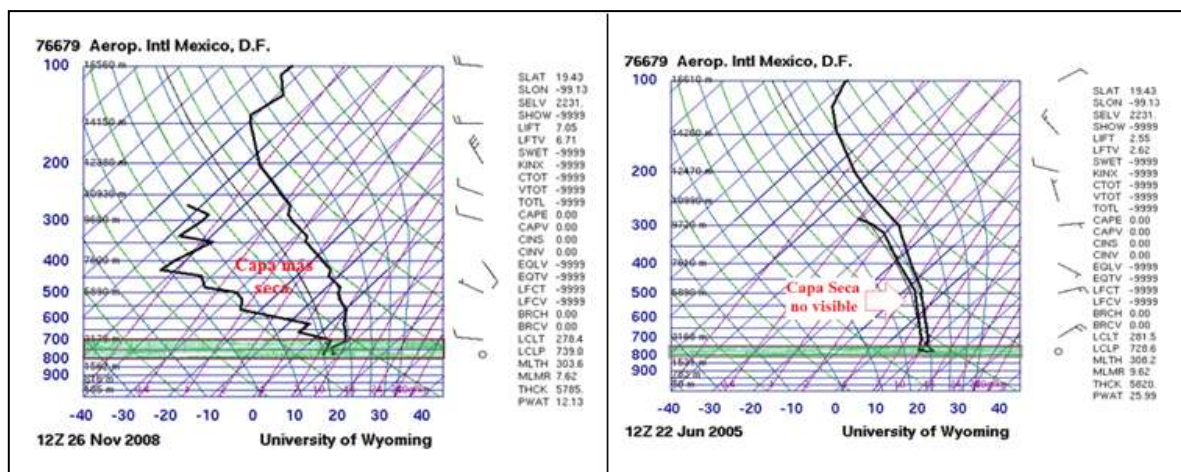
La niebla frontal para este tipo de análisis se consideró también como de tipo advectivo, debido a que presentan las mismas características en un radiosondeo (inversión de temperatura cercana a la superficie, viento débil o moderado en superficie, cizalladura y advección cálida por encima de la capa de niebla). Las características anteriormente descritas para cada tipo de niebla se encuentran en la tabla 11. De manera general, el espesor de una capa de niebla en el AICM va de diez metros a kilómetro y medio. Como es de esperar, durante la época de mayor precipitación corresponde a los mayores espesores de cada tipo de niebla. También se observó que los tipos de niebla advectivo y frontal presentan el mayor rango de la temperatura ambiente en la inversión térmica.

Del mismo modo, se calculó el Nivel de Condensación por Ascenso (NCA) durante los eventos de niebla, encontrándose cercano a la superficie. Sin embargo, en algunos casos (advectivos, principalmente) este NCA se encuentra por encima de 10 m sobre el suelo.

**Tabla 11.** Rangos para cada tipo de niebla analizados

Tipo de niebla	Época	Altura del comienzo de la inversión térmica (desde la superficie)	Temperatura ambiente de la inversión	Estimación del espesor de la capa de niebla
Radiativa	Húmeda	0m – 900m	1° C- 5°C	10m – 1km
	Seca	0m – 500m	1°C – 4°C	20m– 600m
Advectiva	Húmeda	15m – 400m	2 °C – 6°C	10m – 1.5 km
	Seca	50 m – 600m	1°C – 8°C	15m– 1 km
Frontal	Seca	0m – 500 km	1°C – 8°C	10m– 1.5 km

Respecto a la capa más seca por encima de la niebla, se encontró en ella una depresión de temperatura de hasta 20°C en algunos casos. Esta capa más seca es determinante en la duración del evento de niebla, por lo que en algunos casos de corta duración no está presente. Por ejemplo, el evento mostrado del 26 de noviembre 2008 (figura 24) tuvo una duración de 2 horas sobre el AICM, y se observa una capa más seca sobre la niebla. Como contraejemplo, en el caso del 22 de junio del 2005, la capa más seca no es apreciable (Figura 24).



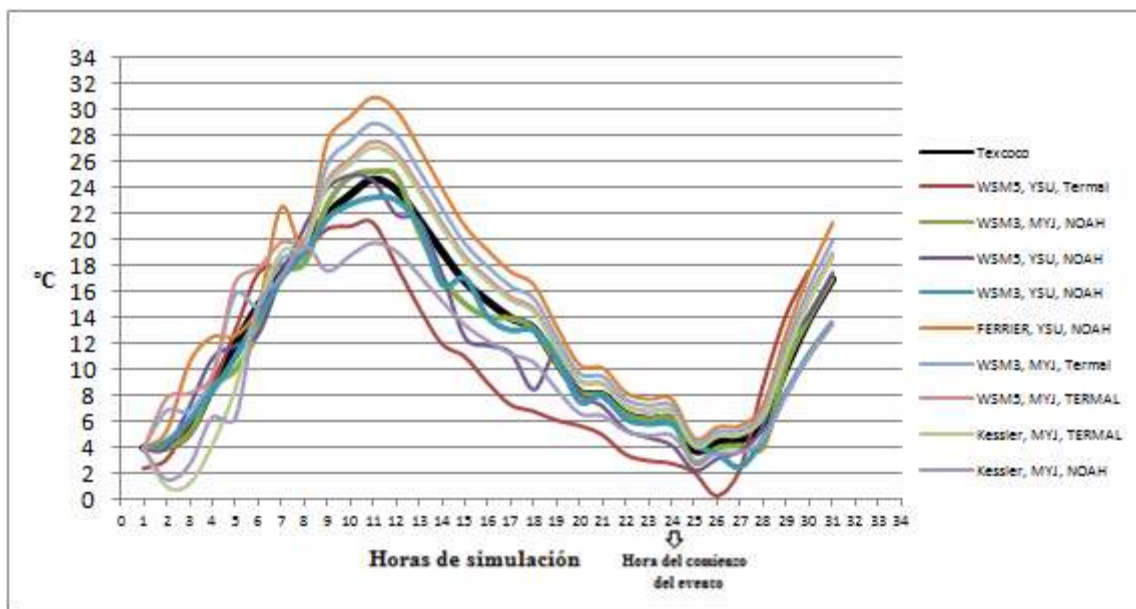
**Figura 24.** Eventos de niebla radiativa en los cuales se destaca la presencia o ausencia de la capa más seca sobre la niebla. El área sombreada de color verde indica la capa de niebla.



#### 4.1.4. Modelaciones con WRF

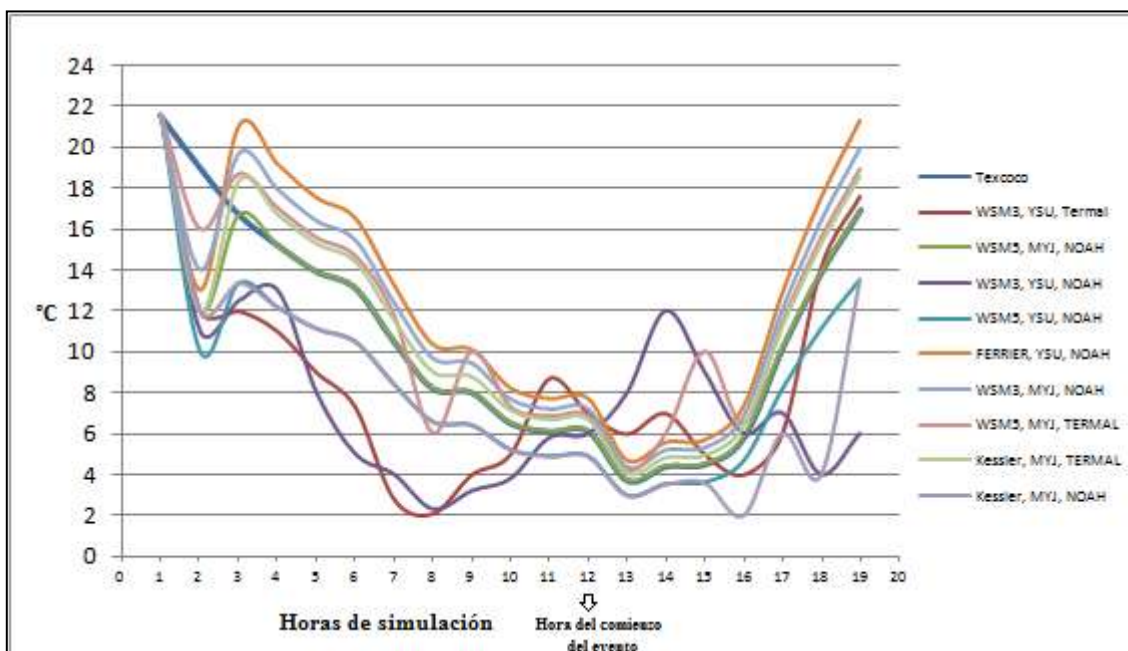
Con el fin de determinar si el modelo WRF puede ser usado para simular la formación de niebla en la región del AICM, se modelaron algunos casos de cada tipo, escogiendo para ello casos típicos en cuanto a duración, hora de inicio del evento y rangos obtenidos en la caracterización de humedad, temperatura y viento. También se experimentó con algunos casos extremos en cuanto a duración.

Los resultados de las modelaciones con las parametrizaciones microfísicas, de Capa Límite Planetaria y superficie, muestran que la combinación WSM3-YSU-NOAH y WSM3-MYJ-NOAH son con las que arrojaron mejores resultados para los tres tipos de niebla (figura 25). Esto posiblemente se debe a que la parametrización WSM3 no trabaja con agua superenfriada (a diferencia de WSM5), donde no hay distinción entre una nube de agua o hielo, por lo que para la región la niebla se modela como una nube y evita que con el paso de tiempo se tomé como escarchar o deposición de gotitas en la superficie.



**Figura 25.** Modelación de evento de niebla advectiva con diferentes combinaciones de parametrizaciones físicas, comenzando 24 horas antes del evento. Temperatura a 2m. Evento del día 04 de enero 2008, comienzo del evento 05:45 a.m., duración 03h 51min.

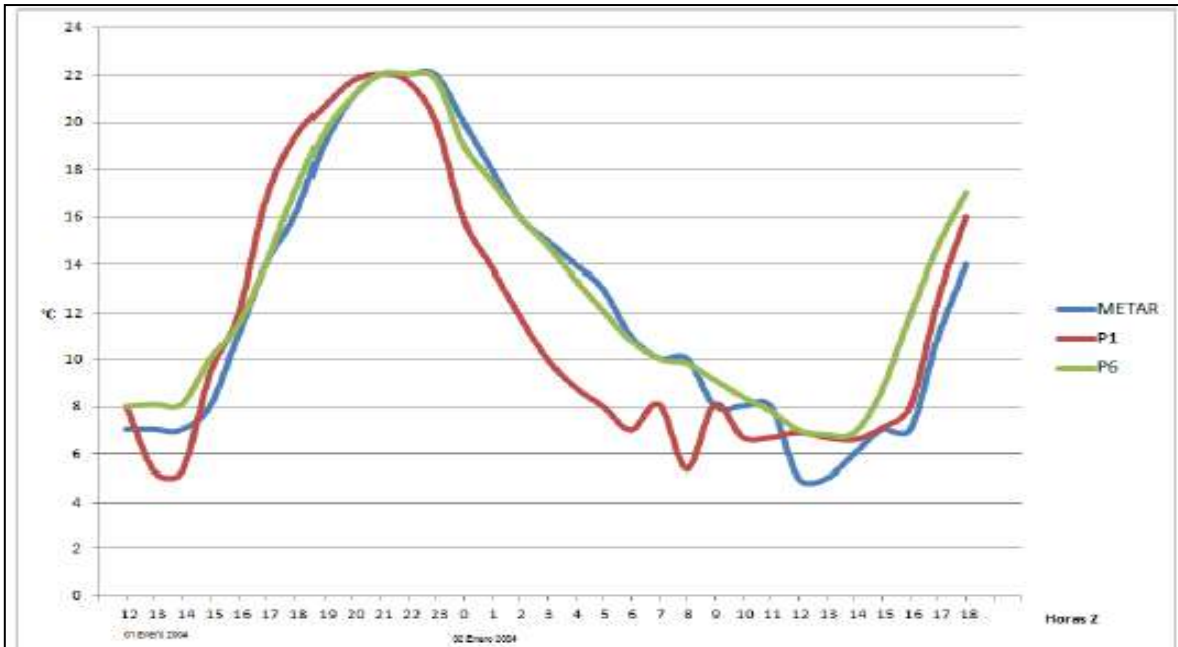
Se hicieron experimentos corriendo el modelo 12 y 24 horas antes del evento con varios casos. El mejor resultado se obtuvo al comenzar la modelación 24 horas previas. En la figura 26 se muestra que, para el mismo evento mostrado en la figura 25, la temperatura a 2 m modelada con las diferentes parametrizaciones físicas, tiene una mayor diferencia entre la temperatura observada en la estación de Texcoco y la modelada. Por esta razón, se recomienda la modelación 24 horas previas para la estabilización del modelo.



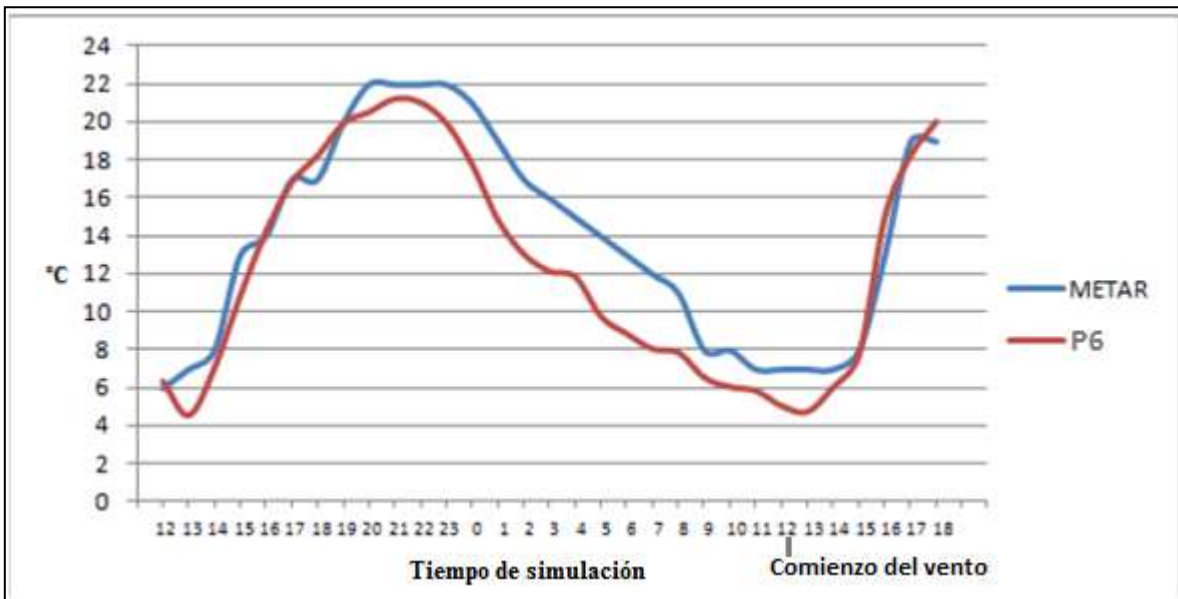
**Figura 26.** Modelación de evento de niebla advectiva con diferentes combinaciones de parametrizaciones físicas, comenzando 12 horas antes del evento. Temperatura a 2m. Evento del día 04 de enero 2008, comienzo del evento 05:45 a.m., duración 03h 51min.

Otros eventos modelados para diferentes tipos de niebla mostraron que también las parametrizaciones WSM3-YSU-NOAH y WSM3-MYJ-NOAH, tienen un buen comportamiento, como se observa en las figuras 27 y 28.

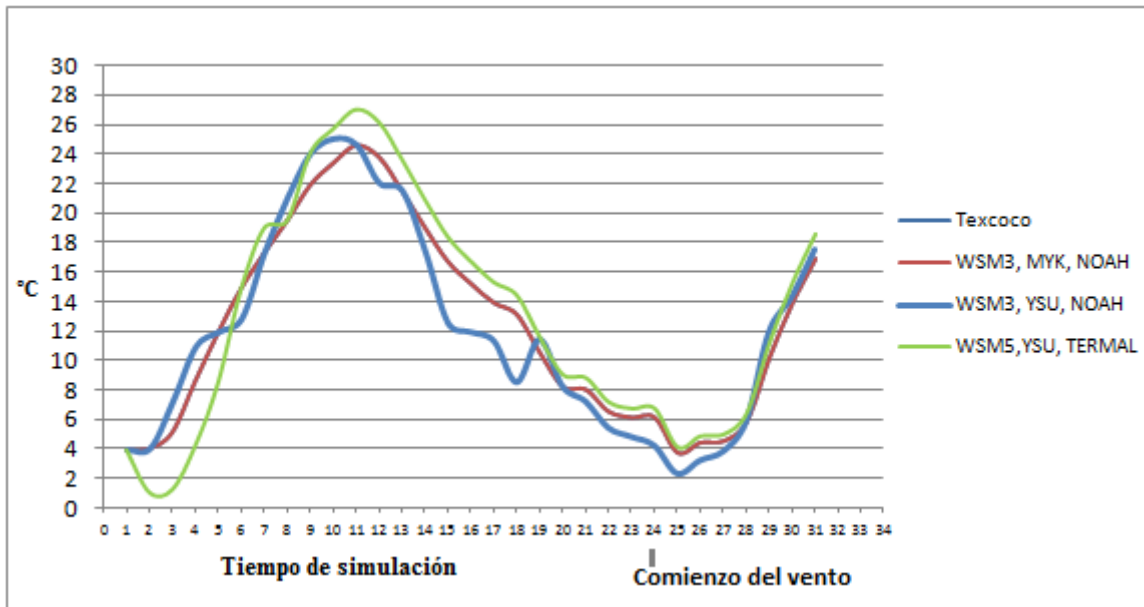
En los casos modelados, de nieblas frontales y advectivas, se obtuvo que la combinación las parametrizaciones WSM3-YSU-NOAH es la que presenta un mejor ajuste con los datos observados. Sin embargo, para la niebla de tipo radiativa la combinación WSM5-YSU-TERMAL dio mejores resultados (figura 29).



**Figura 27.** Temperatura a 2m de datos observados en el AICM y de modelación con WRF con parametrizaciones físicas: WSM3, MYJ, NOAH (P1) y WSM3, YSU, NOAH (P6). Niebla frontal el 02 de enero 2004 a las 06:00 a.m. (12Z). Duración: 03h 35 min.

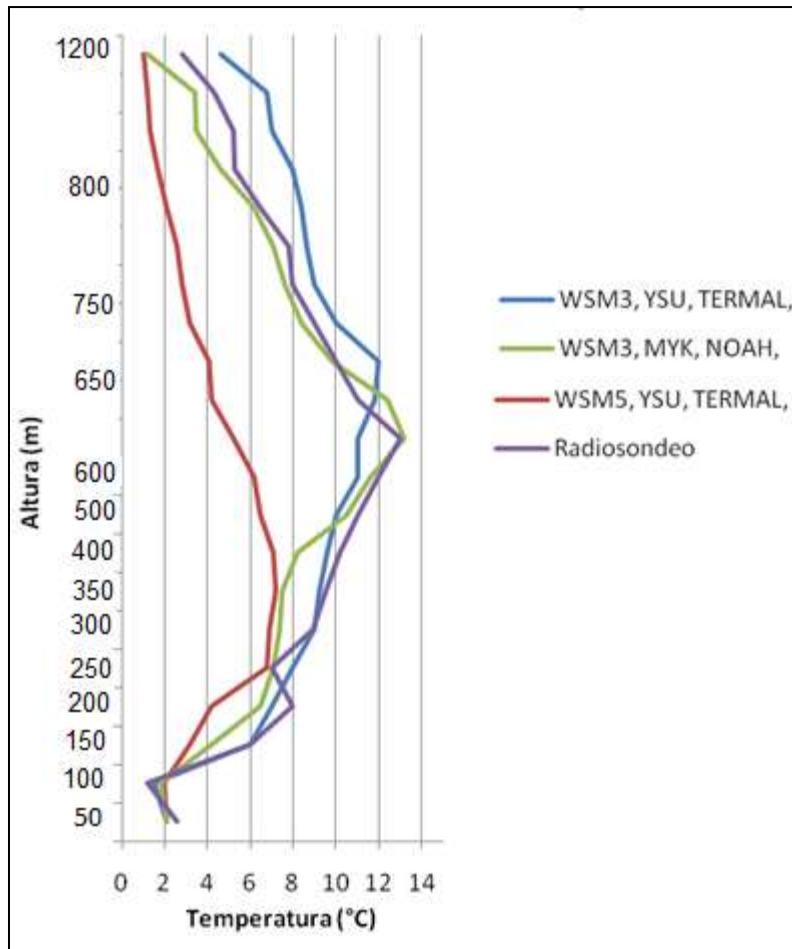


**Figura 28.** Temperatura a 2m de datos observados en el AICM y de modelación con WRF con parametrizaciones físicas: WSM3-YSU-NOAH (P6). Niebla advectiva el 09 de noviembre 2012 a las 05:55 a.m. (~12Z). Duración: 04 horas 35 minutos.



**Figura 29.** Temperatura a 2m. de datos observados en el AICM y de modelación con WRF con parametrizaciones físicas: WSM3-MYK-NOAH, WSM3-YSU-NOAH y WSM5-YSU-TERMAL. Niebla radiativa el 09 de noviembre 2004 a las 05:45 a.m. (~12Z). Duración: 03 horas.

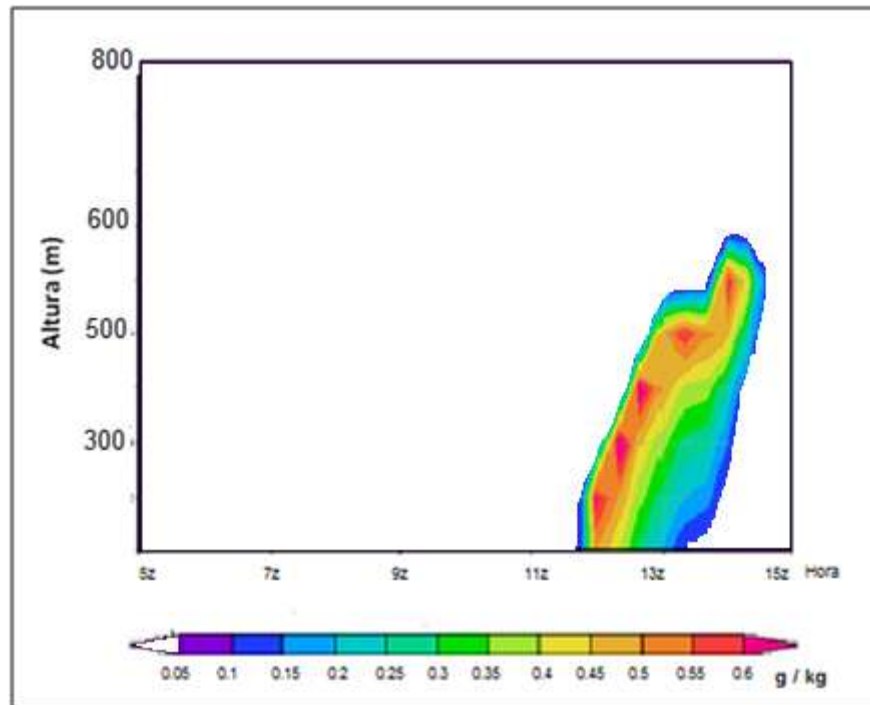
En la figura 30, se muestra la temperatura en la vertical para un caso de niebla tipo frontal (formación de niebla durante el frente frío). Se puede apreciar el comportamiento de la temperatura según las parametrizaciones utilizadas, así como la inversión de temperatura indicativa de la capa de niebla. Se observa que la inversión de temperatura medida por el radiosondeo llega alrededor de los 600 m de altura.



**Figura 30.** Temperatura en la vertical de un evento de niebla tipo frontal en el radiosondeo del Observatorio de Tacubaya y modelación con parametrizaciones en WRF. Evento del día 12 de febrero del 2009.

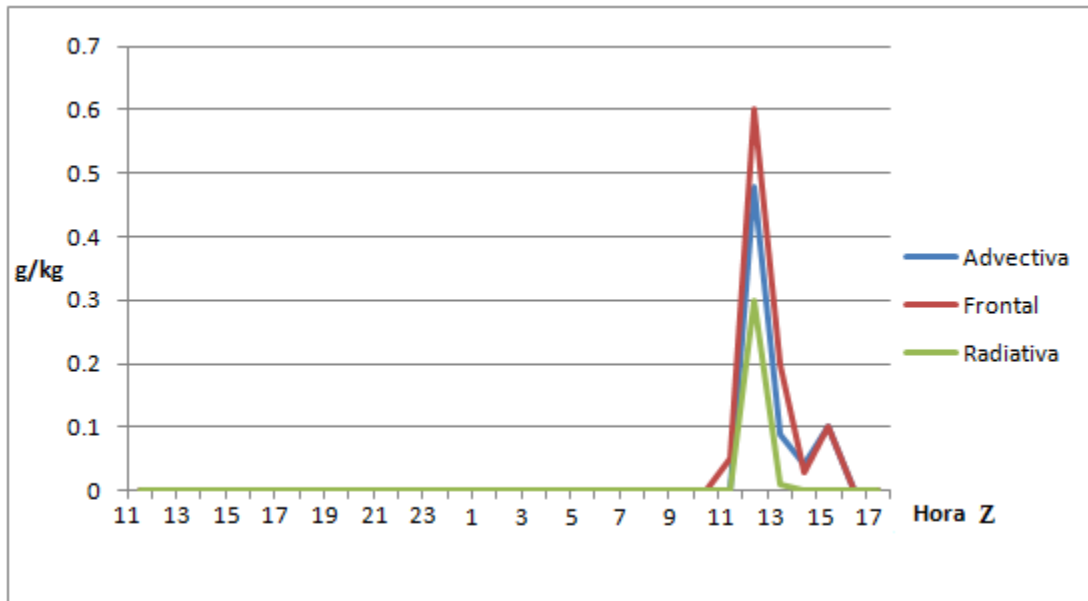
Este mismo evento de niebla puede mostrarse mediante la razón de mezcla para dar un idea de su extensión, como se muestra en la figura 31. Cabe aclarar que la razón de mezcla de agua de nube se utilizó para estimar el espesor de la capa de niebla en la vertical.

Los valores de razón de mezcla de agua de nube obtenidos con WRF (figura 31), se encuentran dentro del rango de observaciones medidas por otros autores, como por Justo (1981) el cual describe que para nieblas en regiones montañosas los valores se encuentran entre 0.3 y 0.8 g/kg.



**Figura 31.** Razón de mezcla de agua de nube en la vertical para niebla tipo frontal para el evento del día 12 de febrero del 2009 con las parametrizaciones descritas en la figura 30.

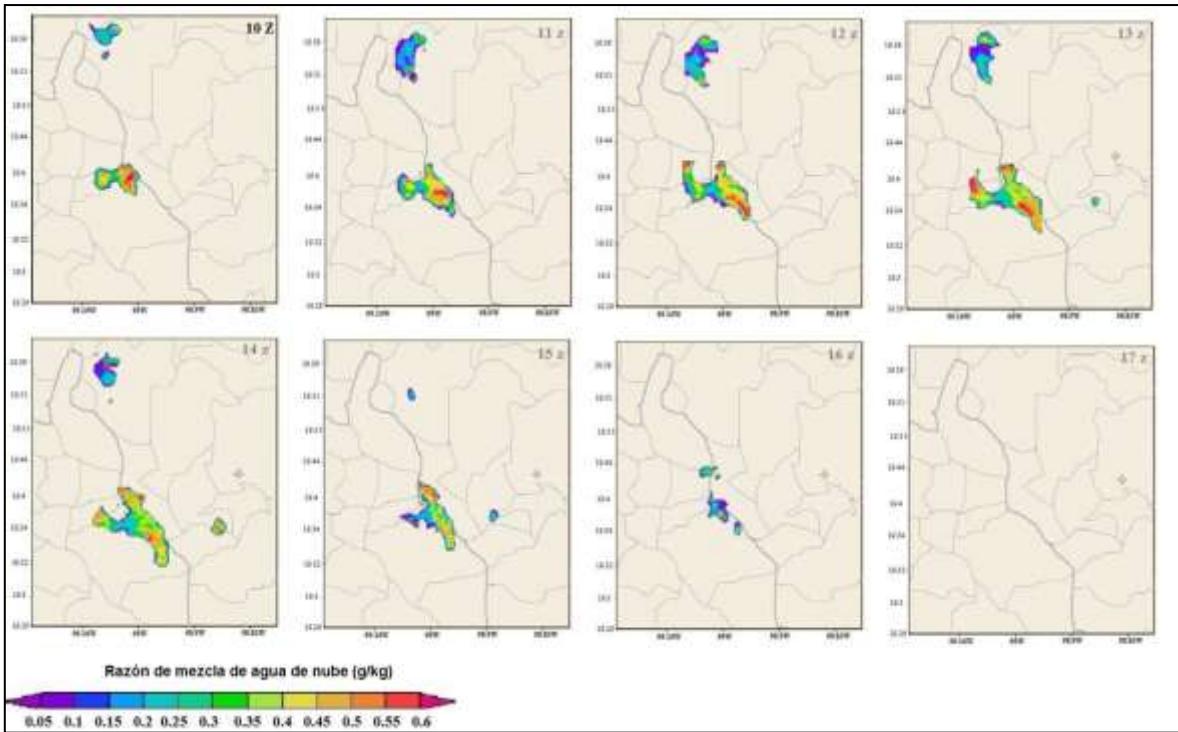
Las simulaciones hechas en WRF muestran que la mezcla de agua de la nube es un buen indicador de la presencia de niebla, coincidiendo con la hora del evento y el orden de magnitud estimado por otros autores (Figura 32). En la figura 34 se muestra la evolución espacial y temporal de la razón de mezcla de agua de nube resultado de la modelación para un evento de niebla advectivo que comienza a las 11:30Z (el primer reporte en el AICM) y cuyo último reporte del evento es a las 15:35Z.



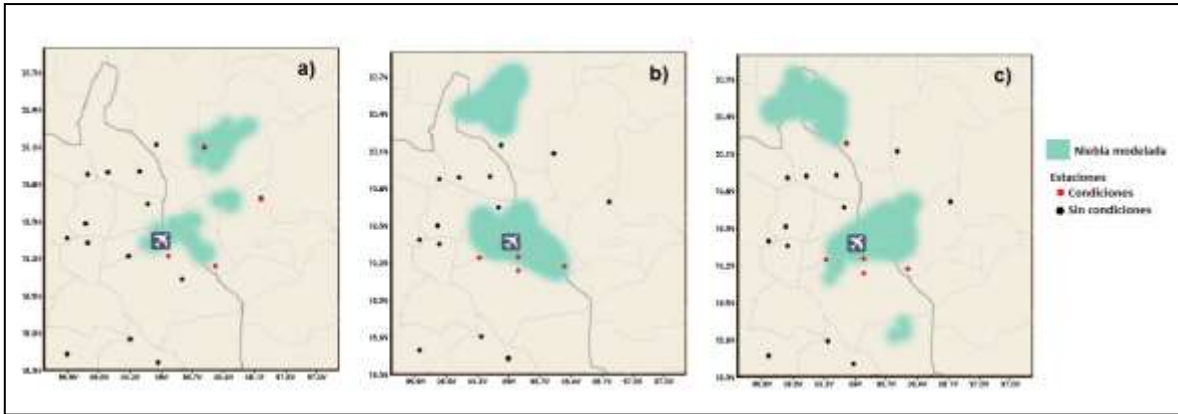
**Figura 32.** Razón de mezcla de agua de nube. Modelaciones para evento advectivo (09 de noviembre 2012 a las ~12Z, duración: 04 horas 35 minutos); frontal (02 de enero 2004 a las 12Z, duración 5 horas); y radiativo (09 de noviembre 2004 a las ~12Z, duración: 03 horas).

Una forma de verificar la extensión espacial mediante la razón de mezcla de agua de nube de las modelaciones, es comparar con datos de estaciones. Sin embargo, las estaciones automáticas no tienen reporte de fenómeno visible, por lo cual se compararon las características medidas del evento modelado en el AICM (Tabla 10) con las de los observados en las estaciones aledañas. Esta primera aproximación se muestra en la figura 34 para diferentes tipos de niebla, considerando la razón de mezcla de agua de nube como niebla observada.





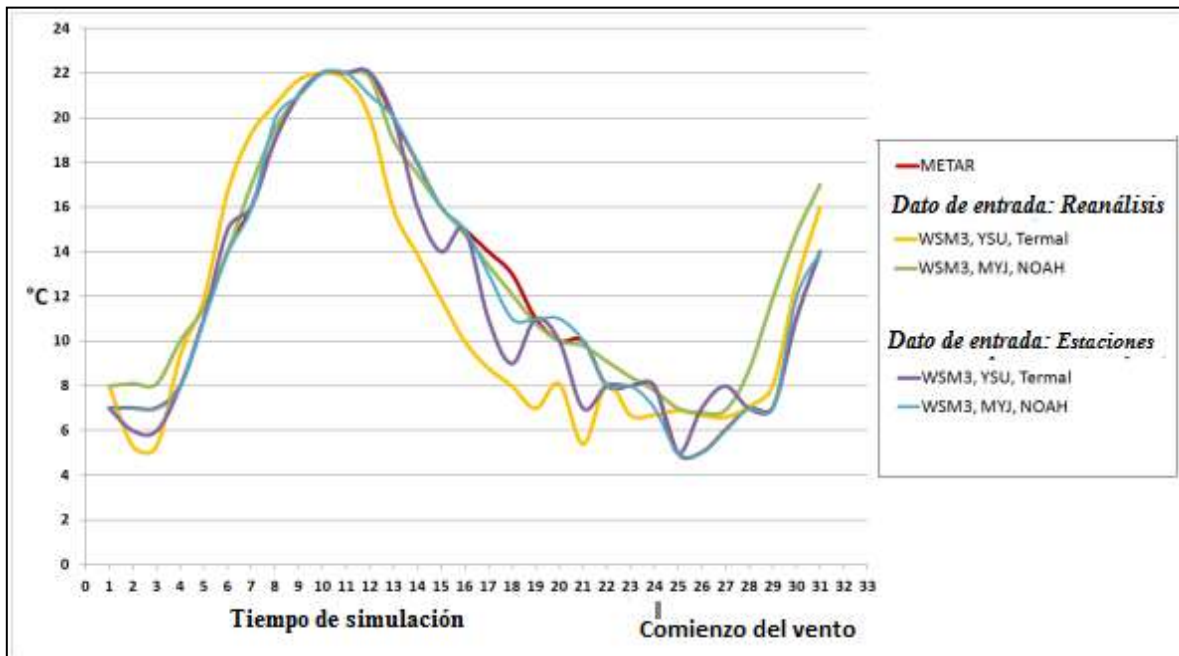
**Figura 33.** Razón de mezcla de agua de nube en superficie para el evento advectivo del 09 de Noviembre del 2012, modelación con parametrización WSM3-YSU-NOAH.



**Figura34.** Niebla modelada a las 12Z. a) Niebla radiativa del 09 de noviembre 2004; b) niebla advectiva 09 de noviembre 2012; c) niebla frontal del 02 de enero 2004. Los puntos en el mapa son estaciones automáticas, en las cuales el color rojo indica condiciones propicias para formación de niebla.



En algunos experimentos el modelo fue alimentado con datos de estaciones en superficie como datos de entrada y actualizados cada tres horas. Esto se hizo por medio del módulo OBSGRID de WRF, el cual permite con un cierto formato, cambiar los datos de entrada al modelo manualmente y actualizar sus valores en cada paso de tiempo. De esta manera se obtuvo un mejor ajuste de las variables de interés para la región (Figura 35). Estos experimentos se hicieron como una primera aproximación a fin de probar si los resultados del modelo arrojan un mejor ajuste con respecto a lo observado.



**Figura 35.** Modelación con WRF para un evento de niebla frontal, teniendo como datos de entrada reanálisis y datos de estaciones automáticas, alimentando al modelo cada tres horas. Niebla advectiva el 09 de noviembre 2012 a las 05:55 a.m. (~12Z). Duración: 04 horas 35 minutos.

#### 4.1.5. Estimación de la temperatura de saturación para niebla radiativa en el AICM

Los valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  calculados a partir del modelo de Labajo et al. (1995) se obtuvieron con los datos de temperatura y humedad de la hora de comienzo de los eventos radiativos, tomándose en cuenta sólo los días en los que se reportó niebla de este tipo y operando los datos de manera mensual, resultando así los coeficientes como una media anual. Este cálculo se muestra en la tabla 12.

**Tabla 12.** Cálculo de los coeficientes  $a$  y  $b$ .

Mes	Coeficientes de regresión		Coeficientes de correlación	Coeficiente de determinación	Error estándar
	a	b	r	r <sup>2</sup> (%)	
Enero	-0.2	-0.8	0.80	64	6.4
Febrero	-0.8	-1.9	0.87	75	4.6
Marzo	-1.5	-7.8	0.89	79	7.42
Abril	-1.8	-7.1	0.84	71	8.24
Mayo	-6.4	-8.9	0.82	68	6.9
Junio	-4.2	-7.8	0.87	76	9.5
Julio	-3.2	-8.4	0.88	78	9.4
Agosto	-4.1	-4.6	0.83	69	8.7
Septiembre	-3.2	-5.6	0.80	64	6.7
Octubre	-2.3	-2.8	0.91	82	7.8
Noviembre	-0.4	-1.2	0.92	85	8.2
Diciembre	-1.2	-0.9	0.89	79	7.1
<b>Anual</b>	<b>-2.4</b>	<b>-4.8</b>	0.86	74.17	7.58

Por lo tanto, la ecuación para la estimación de la temperatura de formación de niebla será:

$$T_f = T_M - \frac{(100 - h_M) + 2.4}{4.8} + \Delta T$$

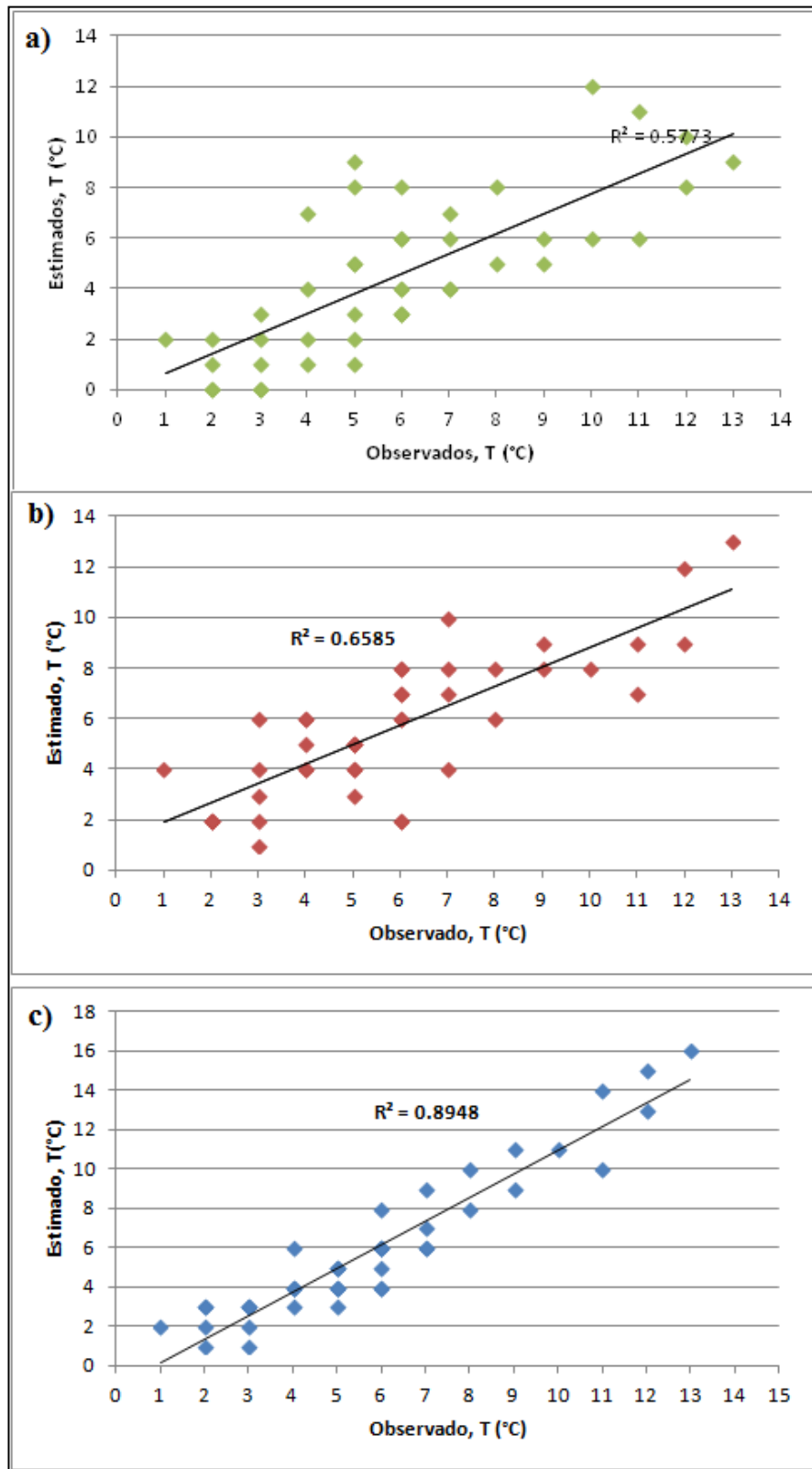
Se observó en el análisis de los datos observados, que tomar la depresión de temperatura del primer reporte del día de niebla como la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) en la fórmula, cuenta con un mejor ajuste que si se toma las temperaturas en un cierto rango de tiempo. Se

conoce por los datos analizados que depresión de temperatura al momento de la formación de niebla, se encuentra entre 3°C y 0°C, siendo 0°C el valor de mayor frecuencia.

Para los valores de  $T_M$  y  $h_M$ , el modelo original toma en cuenta el valor de temperatura máxima del día y el valor de la humedad a esa hora. Además, también se considera un periodo de 3 horas previas a un evento de niebla para que los cambios de humedad no sean significativos. Sin embargo, los experimentos realizados en esta investigación mostraron una buena estimación de la temperatura de formación seis horas previas al evento en la mayoría de los casos, en especial en la época seca del año para niebla radiativa. Por su parte, en la época de mayor precipitación esta estimación de temperatura no coincide con las observaciones, aunque la diferencia es menor que 2°C.

En la figura 36 se muestra la correlación que se obtuvo con el modelo modificado y el modelo original respecto a los datos observados. El modelo modificado con los valores de los días de niebla en el AICM para la temperatura de formación de niebla radiativa, calculado 6 horas antes del evento, es el que obtuvo el mejor valor del coeficiente de determinación (89.5%).

Esta fórmula que estima la temperatura de formación de niebla, puede ser aplicada seis horas previas al posible evento, con buenos resultados. Si se sabe que la mayoría de niebla radiativa se forma alrededor de las 8:00 am, y si se observa noches frías con cielo despejado y viento moderado a calmo en la noche previa (condiciones que favorezcan en el enfriamiento radiativo) al probable evento de niebla, entonces es posible calcular cual sería la temperatura de formación de niebla desde las 2 a. m. con el modelo propuesto en este trabajo con una certeza del 89% en los casos analizados con  $\pm 1^\circ\text{C}$ , mientras que el 11% se estima con una  $\pm 3^\circ\text{C}$  de diferencia en lo estimado y observado.



**Figura 36.** Correlación entre el modelo para la estimación de la temperatura de formación de niebla radiativa y los datos observados en el AICM. a) Modelo de Labajo et al. (1995). b) Modelo modificado con datos de  $T_M$  y  $h_M$  tres horas antes del evento de niebla. c) Modelo modificado con datos de  $T_M$  y  $h_M$  seis horas antes del evento de niebla.

## ***4.2. Comentarios y conclusiones***

En el presente trabajo, se llevó a cabo una caracterización de los eventos de niebla que ocurrieron en la región de Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) en el período 2003 – 2012, la cual es parte de una climatología de niebla para esta región de estudio.

Los eventos de niebla para la región del AICM se presentan durante todo el año, formándose en la mayoría de los casos por la mañana. Sin embargo, en la época seca los eventos predominantes de niebla son por frentes fríos, siendo éstos la principal fuente de humedad. En la mayoría de los casos de nieblas frontales, éstas ocurren después del paso del sistema y durante éste, lo cual se explica por las características de la masa fría (humedad alta) y que la velocidad de viento es menor que cuando entra el sistema a la región.

Una depresión de temperatura cercana a cero y una humedad alta (por arriba del 80%) no son condiciones suficientes para formación de niebla, la rapidez del viento es un factor que es importante: si existe viento intenso, los procesos de turbulencia provocan una atmósfera inestable y que la inversión térmica no se llegue a formar.

En cuanto a las tendencias de depresión de temperatura, en horas previas a un evento de niebla, en la época húmeda son poco marcadas en comparación con la época seca, lo cual es de esperarse debido a la presencia de humedad.

En ciertos casos, los tipos de niebla advectiva y frontal pueden presentar características similares seis horas previas al evento (tendencia de la temperatura, humedad y viento). Es por ello que, para diferenciar cada tipo, es importante recurrir al mecanismo de formación por medio de información sinóptica.

Por otra parte, la capa de los casos de niebla observados presenta un máximo espesor de 1.5 km, siendo el valor más común de 500 m sobre la superficie.

Por otra parte, se utilizó el modelo WRF con diferente configuración con el objetivo de investigar si dicho modelo es capaz de reproducir la formación de niebla en la región de la Cuenca de México. WRF es un modelo que no se había usado para niebla en la región de estudio, de ahí el interés con el cual se analizaron los resultados de dicho modelo y obteniendo que para los casos modelados resultados contundentes en cuanto a temperatura y razón mezcla de agua de nube con las observaciones.

En la mayoría de los casos simulados con WRF, y en particular para nieblas de advección, de los tiempos observados de la formación y disipación muestran concordancia con el modelo, así como con la tendencia de temperatura y la cantidad de agua de las nubes. Sin embargo, es necesario seguir trabajando en las simulaciones dado que las velocidades del viento son subestimadas por el modelo.

Las parametrizaciones que arrojan mejores resultados en las modelaciones realizadas fueron aquéllas en las que se trabajan procesos para lluvia caliente y fría. Particularmente, la parametrización WMS3 (sin agua superenfriada) hace una diferencia en las temperaturas menores a 0°C para los procesos de hielo, lo cual impide que procesos de hielo intervengan cercanos a la superficie evitando, por ejemplo, la formación de escarcha o la deposición de humedad en la superficie en forma de rocío.

Si bien este trabajo es una forma de diagnóstico de los eventos de niebla para la región del AICM, la cual puede servir de base para mejorar el pronóstico de niebla regional.

Sin embargo, los resultados mostrados de las modelaciones de WRF son sólo algunos casos 'típicos' de niebla, por lo que para evaluar la eficiencia de WRF como diagnóstico en la región de interés, se deben realizar un mayor número de experimentos para tener un porcentaje de acierto y error.

No obstante, las simulaciones trabajadas en esta investigación permitieron conocer cuál fue la mejor configuración para esos casos de niebla, lo cual refleja buenos resultados en

cuanto a horas previas del evento de correr el modelo, duración y hora de formación del, comportamiento de temperatura y cantidad de razón de agua de nube en los eventos de niebla. Esto es un indicativo de que WRF, puede simular eventos de niebla para la región de interés con la configuración usada.

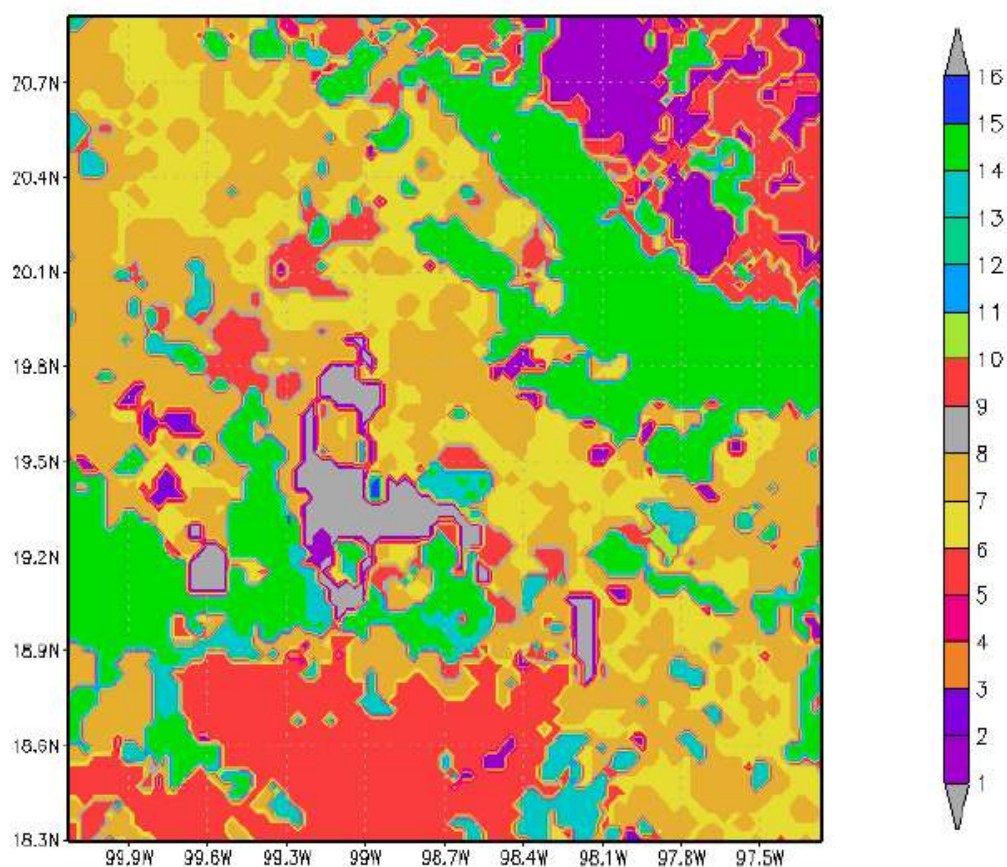
Por último, como no todos los casos modelados niebla radiativa con WRF, tuvieron un comportamiento de las variables analizadas contundentes con las observaciones, se presentó un modelo para estimar de la temperatura de formación de niebla radiativa, el cual es un modelo modificado de Labajo et al. (1995), con este modelo se obtuvieron buenos resultados en la mayoría de los casos. Esto depende de que previamente no haya velocidades de viento que marquen una variación significativa de humedad para esta estimación.

## Apéndice I

### Uso del suelo usado en el modelo WRF

Categoría en WRF: USGS 24-category Land Use Categories  
Modificado con base en: INEGI 2010

Option Land Use
1 Urban and Built-up Land
2 Dryland Cropland and Pasture
3 Irrigated Cropland and Pasture
4 Mixed Dryland/Irrigated Cropland and Pasture
5 Cropland/Grassland Mosaic
6 Cropland/Woodland Mosaic
7 Grassland
WPS
WRF-ARW V3: User's Guide 3-58
8 Shrubland
9 Mixed Shrubland/Grassland
10 Savanna
11 Deciduous Broadleaf Forest
12 Deciduous Needleleaf Forest
13 Evergreen Broadleaf
14 Evergreen Needleleaf
15 Mixed Forest
16 Water Bodies
17 Herbaceous Wetland
18 Wooden Wetland
19 Barren or Sparsely Vegetated
20 Herbaceous Tundra
21 Wooded Tundra
22 Mixed Tundra





## Apéndice II

### Configuración en WRF

#### namelist.wps

```
&share  
wrf_core = 'ARW',  
max_dom = 3,  
start_date = '2004-11-08_12:00:00','2004-11-08_12:00:00','2004-11-08_12:00:00',  
end_date = '2004-11-09_18:00:00','2004-11-09_18:00:00','2004-11-09_18:00:00',  
interval_seconds = 21600  
io_form_geogrid = 2,  
/  

```

```
&geogrid  
parent_id = 1, 1, 2,  
parent_grid_ratio = 1, 3, 3,  
i_parent_start = 1, 31, 9,  
j_parent_start = 1, 17, 30,  
e_we = 74, 112, 94,  
e_sn = 61, 97, 91,  
geog_data_res = '10m','2m','2m',  
dx = 27000,  
dy = 27000,  
map_proj = 'mercator',  
ref_lat = 19.43  
ref_lon = -99.07,  
truelat1 = 30.0,  
truelat2 = 60.0,  
stand_lon = -98.0,  
geog_data_path = '/home/wrf/WRF/geog/geog'  
/  

```

```
&ungrib  
out_format = 'WPS',  
prefix = 'FILE',  
/  

```

```
&metgrid  
fg_name = 'FILE'  
io_form_metgrid = 2,  
/  

```

## namelist.input

```
time_control
run_days           = 0,
run_hours          = 30,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2004, 2004, 2004,
start_month        = 11, 11, 11,
start_day          = 08, 08, 08,
start_hour         = 12, 12, 12,
start_minute       = 00, 00, 00,
start_second       = 00, 00, 00,
end_year           = 2004, 2004, 2004,
end_month          = 11, 11, 11,
end_day            = 09, 09, 09,
end_hour           = 18, 18, 18,
end_minute         = 00, 00, 00,
end_second         = 00, 00, 00,
interval_seconds   = 21600
input_from_file    = .true.,.true.,.true.,
history_interval   = 60, 60, 60,
frames_per_outfile = 1000, 1000, 1000,
restart            = .false.,
restart_interval   = 5000,
io_form_history    = 2
io_form_restart    = 2
io_form_input      = 2
io_form_boundary   = 2
debug_level        = 0
auxinput1_inname = "metoa_em.d<domain>.<date>"
/

&domains
time_step          = 180,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom            = 3,
e_we               = 74, 112, 94,
e_sn                = 61, 97, 91,
e_vert             = 35, 35, 35,
eta_levels          = 1.000, 0.995, 0.990, 0.985, 0.978,
                   0.969, 0.964, 0.958, 0.951, 0.946,
                   0.941, 0.938, 0.922, 0.894, 0.860,
                   0.817, 0.766, 0.707, 0.644, 0.576,
                   0.507, 0.444, 0.380, 0.324, 0.273,
```

```

                                0.228, 0.188, 0.152, 0.121, 0.093,
                                0.069, 0.048, 0.029, 0.014, 0.000,
num_metgrid_levels           = 27,
num_metgrid_soil_levels     = 2,
dx                           = 27000,9000,3000,
dy                           = 27000,9000,3000,
grid_id                       = 1,  2,  3,
parent_id                     = 1,  1,  2,
i_parent_start                = 1,  31,  9,
j_parent_start                = 1,  17,  30,
parent_grid_ratio             = 1,  3,  3,
parent_time_step_ratio       = 1,  3,  3,
feedback                       = 1,
smooth_option                 = 0
/

```

```

&physics
mp_physics                    = 3,  3,  3,
ra_lw_physics                 = 1,  1,  1,
ra_sw_physics                 = 1,  1,  1,
radt                          = 27,  27,  27,
sf_sfclay_physics             = 1,  1,  1,
sf_surface_physics            = 1,  1,  1,
bl_pbl_physics                = 1,  1,  1,
bldt                          = 0,  0,  0,
cu_physics                    = 1,  1,  0,
cudt                          = 5,  5,  5,
isfflx                        = 1,
ifsnow                        = 1,
icloud                        = 1,
surface_input_source          = 1,
num_soil_layers               = 4,
sf_urban_physics              = 0,  0,  0,
/

```

```

&fdda
/

```

```

&dynamics
w_damping                     = 0,
diff_opt                       = 1,
km_opt                         = 4,
diff_6th_opt                   = 0,  0,  0,
diff_6th_factor                = 0.12, 0.12, 0.12,
base_temp                       = 290.
damp_opt                       = 0,
zdamp                          = 5000., 5000., 5000.,

```

```
dampcoef           = 0.2, 0.2, 0.2
khdif              = 0, 0, 0,
kvdif              = 0, 0, 0,
non_hydrostatic    = .true., .true., .true.,
moist_adv_opt      = 1, 1, 1,
scalar_adv_opt     = 1, 1, 1,
/
```

```
&bdy_control
spec_bdy_width     = 5,
spec_zone          = 1,
relax_zone         = 4,
specified          = .true., .false., .false.,
nested             = .false., .true., .true.,
/
```

```
&grib2
/
```

```
&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups = 1,
/
```

---

## Apéndice III

---

### METAR

El formato METAR está dividido en grupos de números y letras, los cuales proporcionan información de variables meteorológicas, como se muestra a continuación:

**METAR CCCC YYGGggZ dddff(f)Gf<sub>m</sub>f<sub>m</sub>(f<sub>m</sub>)KT d<sub>n</sub>d<sub>n</sub>d<sub>n</sub>Vd<sub>x</sub>d<sub>x</sub>d<sub>x</sub> VVVVSM**  
**w'w'(ww) T'T'/Td'Td' AP<sub>H</sub>P<sub>H</sub>P<sub>H</sub>P<sub>H</sub> RMK SLPP<sub>o</sub>P<sub>o</sub>P<sub>o</sub> 5appp 6RRRt<sub>R</sub>**  
**8/C<sub>L</sub>C<sub>M</sub>C<sub>H</sub>9P<sub>24</sub>P<sub>24</sub> Rew'w'**

Donde cada sección representa:

**CCCC:** Identificador de Lugar. Se utilizan los indicadores de lugar establecidos por OACI.

**YYGGggZ:** Fecha y Hora del Informe. La fecha de la observación debe indicarse con dos cifras seguidas de la hora efectiva en la cual se realizó la observación, en horas y minutos UTC, seguida de la letra Z.

**dddff(f)Gf<sub>m</sub>f<sub>m</sub>(f<sub>m</sub>)KT dndndnvdxdxdx:** Dirección e Intensidad del Viento, **dirección (ddd)**, **intensidad (ff(f))**, **rachas (Gf<sub>m</sub>f<sub>m</sub>(f<sub>m</sub>))**, puede estar acompañado de otra sección donde se especifique otras características del viento (**d<sub>n</sub>d<sub>n</sub>d<sub>n</sub>Vd<sub>x</sub>d<sub>x</sub>d<sub>x</sub>**).

**VVVVSM:** Visibilidad dada en millas estándar, SM (Statute Miles).

**w'w' (ww):** Tiempo Significativo (presente).- Son los fenómenos que ocurren en el momento de la observación, como por ejemplo: FG Niebla, BR bruma, GR granizo, RA lluvia, entre otros. En esta sección también se puede especificar la intensidad del fenómeno observado, así como si estás en el lugar de observación o a qué distancia se observan.

Para el caso de niebla en esta sección, algunos indicativos son:

**VCFG** Se utilizará para indicar cualquier tipo de niebla observada en las proximidades (entre 5 y 10 millas), es decir la niebla se encuentra fuera del punto de observación.

**PRFG** indica que una parte sustancial de la estación está cubierta por niebla mientras que el resto está limpia de niebla.

**BCFG** Se utilizará para indicar bancos (parches) de niebla al azar cubriendo la estación.

**MIFG** Se utilizará cuando la visibilidad a 2 metros por encima del suelo sea de 5/8SM o más y la visibilidad aparente en la capa de niebla sea menor de 5/8SM

Por ejemplo, Se tienen bancos de niebla alrededor de la estación, y la visibilidad predominante es de 4SM, se puede reportar de 2 formas 4SM BCFG en los fenómenos de tiempo presente o 4SM BR y en la sección de notas BCFG.

*METAR MMMX 311145Z 19010KT 4SM BCFG OVC020 13/13 A3028 RMK 8/7//=  
o*

*METAR MMMX 311145Z 19010KT 4SM BR OVC020 13/13 A3028 RMK 8/7//  
BCFG=*

Nota: Solo cuando la visibilidad sea mayor o igual a 5SM se podrá reportar VCFG.

**T'T/T'dT'd:** Temperatura ambiente y Temperatura de Punto de Rocío. Se codificarán en dos dígitos, en grados Celsius enteros.

**AP<sub>H</sub>P<sub>H</sub>P<sub>H</sub>P<sub>H</sub>:** Ajuste altimétrico (QNH). QNH: Se utiliza cuando el avión vuela por debajo de lo que se conoce como altitud de transición. Es la presión atmosférica del aeródromo referida al nivel del mar. En América se da en pulgadas de mercurio. El valor de QNH se codificará en cuatro dígitos precedidos de la letra "A" que indica que este valor esta dado en pulgadas de mercurio y se debe aproximar hasta las centenas.

**RMK:** Sección para el grupo de notas.

**SLPPoPoPo:** Presión Reducida al Nivel Medio del Mar. Este grupo será incluido en el informe de cada 3 horas (00Z, 03Z, 06Z, 09Z, 12Z, 15Z, 18Z y 21Z).

**5appp:** variación trihoraria de la presión. Este grupo representa el cambio de presión al nivel de la estación durante las últimas tres horas, el cual es incluido en el informe de cada 3 horas (00Z, 03Z, 06Z, 09Z, 12Z, 15Z, 18Z y 21Z).

**6RRRt<sub>R</sub>:** Es la cantidad de precipitación caída en la hora precedente al informe, la cual deberá ser reportada en un grupo de cinco cifras.

**8/C<sub>L</sub>C<sub>M</sub>C<sub>H</sub>:** Grupo de las nubes. Este grupo consta de 5 caracteres y será codificado en forma horaria, el tipo de nubes se reportará de acuerdo al código internacional de nubes (OMM), donde: **8/** es el indicador del grupo de nubes, **C<sub>L</sub>** tipo de Nubes Bajas, **C<sub>M</sub>** Tipo de Nubes Medias, **C<sub>H</sub>** Tipo de Nubes Altas.

**9P<sub>24</sub>P<sub>24</sub>:** Valor de cambio de la presión en 24 horas. Este grupo será incluido en el informe de cada 3 horas (00Z, 03Z, 06Z, 09Z, 12Z, 15Z, 18Z y 21Z).

**Rew'w':** Condiciones Meteorológicas Recientes. Si el fenómeno meteorológico ha sido observado durante el periodo de la última observación de rutina se codifica como fenómeno reciente, en esta sección no se requiere indicar intensidad y descriptor del fenómeno (SMN, Manual del Meteorólogo Observador, 2004).

*Ejemplo de METAR del AICM:*

- Presencia de Niebla a cierta distancia observable:

200907241225 METAR MMMX 241225Z 05006KT 2 1/2SM BR HZ SCT200 12/10  
RMK 8/002 **BCFG NE** VIS TWR=

Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (MMMX), Fecha: 24 de Julio 2009  
12:25Z (06:25 a. m. hora local), Viento: 50° (NE) de 6 kt (3.08 m/s), Visibilidad de 2 1/2 de milla (4,023.35m), presencia de bruma en el lugar de observación, Cantidad de nubosidad: medio nublado de 3/8 - 4/8 octas (SCT) con altura de la base de la nube más baja de 20000 ft (6,096m), Temperatura ambiente de 12°C y Temperatura de Punto de

Rocío de 10°C, Nubes: Altas del tipo Cirrus Spissatus, con Banco de Niebla visible al Noreste del punto de observación. Torre visible.



## *Referencias*

---

ARW (2010): Version 3 Modeling System User's Guide. National Center for Atmospheric Research (NCAR), Mesoscale & Microscale Meteorology Division.

Azpiri, P., Hernández, E., Orucuta, A., Rodríguez, R. (2007): Desarrollo de un Programa Preliminar de Simulación para Determinar la Capacidad de Pistas del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. Tesina de proyecto. Instituto Politécnico Nacional. México, D. F., Agosto 2007.

Baker, R., Cramer, J., Peters J. (2000): Radiation fog: UPS Airlines Conceptual Models and Forecast Methods. UPS Airlines, Louisville, KY. U. S. A.

Byers, H. R. (1959): General Meteorology. McGraw-Hill Book Company, Tercera edición. Estados Unidos. 480-510 pp.

Byers, H. R. (1973): Elements of Cloud Physics. The University of Chicago Press, 191 pp.

Brown, R., & Poach, W. T. (1976): The physics of radiation fog. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 102, 335 – 354.

Cano, D., Palacio, I., Téllez, B., Albaladejo, J. (2001): Estudios de niebla realizados en el CMT en Castilla – La Mancha, V Symposium Nacional de Predicción, INM, Madrid.

Chen, S.-H., & Sun, W.Y. (2002): A one-dimensional time dependent cloud model. J. Meteor. Soc. Japan, 80, 99–118.

Cheol-Han, B., Ji-Woo, L., Song-You, H. (2008): Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF Model. J. KOSAE, 24, Korean Soc. Atmos. Environ. 92-101.

García-García, F & Zarraluqui, V. (2008): A fog climatology for Mexico. *Zeitschrift der Gesellschaft fuer Erdkunde zu Berlín. Die Erde* 139 (1- 2). Berlín, Alemania. pp. 45 – 60.

Goldsmith, G. R., Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., McDonnell, J. J., Asbjornsen, H., Dawson, T. E. (2012): Stable Isotopes Reveal Linkages among Ecohydrological Processes in a Seasonally Dry Tropical Montane Cloud Forest. *Ecohydrology*. 5(6), 779-90.

Guerrero-Higuera, A. M., García-Ortega, E., Matellán-Olivera, V., Sánchez, J.L. (2007): Procesamiento paralelo de los pronósticos meteorológicos del modelo WRF mediante NCL. Sociedad de Arquitectura y Tecnología de Computadores (SARTECO), Jornadas de Computación Reconfigurable y Aplicaciones (JCRA). Universidad Europea Miguel de Cervantes, España.

Herrera, A., Bustos, A., Martner, C., Rico, O., Acha, J., Aguerrebere, R., Heredia, F., Gradilla, L. (2005): Diagnóstico del Transporte de Carga Aérea en México. Instituto Mexicano del Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Publicación técnica No. 273, Sanfandila, Qro, México. Grupo de Física de la Atmósfera, Universidad de León, España.

Hilliker, J. L. & Fritsch, J.M. (1999): An observations-based statistical system for warm season hourly problematic forecasts of low ceiling at the San Francisco International Airport. *J. Appl. Meteorol.*, 38, 1692-1705.

Hobbs P. (1981): *Clouds their formation, optical properties, and effects*. University of Wahington, Academic Press. 497 pp.

Hong, S.-Y., & Lim, J. O. J. (2006): The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129–151.

Ingraham, N.L. & Matthews, R. A. (1988): Fog Drip as a Source of Ground Water Recharge in Northern Kenya. – *Water Resources Research* 24: 1406-1410.

Jiusto, J., (1981): Fog Structure. In: Clouds: Their formation, optical properties, and effects. P. V. Hobbs and A. Deepak (Eds.) Academic Press, 187-239.

Jerez, A., (2011): Tesis de licenciatura: Estudio de las Condiciones en la Formación de Niebla en el Aeropuerto de Toluca como una Herramienta en la Mitigación de Riesgos en las Operaciones Aeronáuticas. Instituto Politécnico Nacional. México, DF.

Kessler, E., (1969): On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. Meteor Monogr10(32), 84.

Labajo, J. J., de Pablo, F., García E, L. (1991): An equation relating temporal changes of relative humidity and temperature: case of variable intervals of time. *Atmósfera*, 4, 257 – 264.

Labajo, J. J., Hernández, P, Izquierdo, J. (1995): Un modelo de pronóstico de temperaturas de formación de niebla de radiación. *Atmósfera*, 8, 115– 126.

Lin, Y. L., Farley, R. D., Orville, H. D. (1983): Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 1065–1092.

Low, R. D. H. (1979): A theoretical investigation of cloud/fog extinction coefficients and their spectral correlations. *Contributions Atmos. Phy.*, 52. 44–57.

Mack, E. J., and Katz, U. (1976): The characteristics of marine fog occurring off the coast of Nova Scotia, report No. CJ-5756-M1, Calspan Corp. (Buffalo, NY)

Martínez, F, X. (2006): *Meteorología Aplicada a la Navegación*. Editorial Centre de Publicacions del Campus Nord, Barcelona, 220 pp.

Mason, B. J. (1961): *The Physics of Cloud*, Claredon Press., Oxford, 671 pp.

Moran, F. (1944): *Apuntes de Termodinámica de la Atmósfera*. I. N. M., Publicaciones serie B (Textos), No. 4 (Ed. Facsímil 1984), Madrid, 345 pp.

Müller, M. D. (2005): Development of a 1D ensemble fog forecast system with variational assimilation. COST-722 Colloquim. Larnaka, Cyprus. May 19-21.

Ramírez, A., Pérez., S., Gómez J., Casasola, L., Avalos, J., Hernández M. (2001): *Informe Climatológico Ambiental*. Cuenca del Valle de México. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal.

Rutledge, S. A., & Hobbs, P. V. (1984): The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cloud-frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 20, 2949–2972.

Salas, J. Q. (2005): *Climatología Aplicada*. Publicacions de la Universitat Jaume I., España, 2005. 260 pp

Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Duda, M., Huang, X., Wang, W., Powers, J. (2008): *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. NCAR Technical Note. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA. 125 pp.

SMN Servicio Meteorológico Nacional (2004): *Manual del Meteorólogo Observador*. Capítulo 9. Datos METAR.

Tao, W.-K., J. Simpson, D. Baker, S. Braun, M.-D. Chou, B. Ferrier, D. Johnson, A. Khain, S. Lang, B. Lynn, C.-L. Shie, D. Starr, C.-H. Sui, Y. Wang, Wetzell, P. (2003): Microphysics, radiation and surface processes in the Goddard Cumulus Ensemble (GCE) model. *Meteor. and Atmos. Phys.*, 82, 97–137.

Tverskoi, P. N. (1965): Physics of the atmosphere. Israel prog. For Scientific Translations, 561 pp.

Van Schalkwyk, L. & Dyson, L. (2013): Climatological Characteristics of Fog at Cape Town International Airport. American Meteorological Society. Junio, 2013.

Vislocky, R.L., Fritsch, J.M. (1997): An automated observations-based system for short-term prediction of ceiling and visibility. Wea. Forecasting, 12, 31-43.

### ***Páginas Web Consultadas Julio 2014***

Web-SMN, Glosario del Servicio Meteorológico Mundial:

<http://smn.cna.gob.mx/glosario/glosario.html>

Web-MetEd1: [https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/dynfog\\_es/](https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/dynfog_es/)

Web-UCAR: [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/contents.html](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/contents.html)

Web-MetEd2: [http://www.meted.ucar.edu/fog\\_int\\_es/](http://www.meted.ucar.edu/fog_int_es/)

Web-MetEd3: <http://www.meted.ucar.edu/dlac/lesson1/print.htm>

Web-RDA: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/#!/description>

Web-WMO:

[http://www.wmo.int/gsearch/gresults\\_es.html?q=Niebla&submit.x=0&submit.y=0&submit=SEARCH#gsc.tab=0&gsc.q=Niebla&gsc.page=4](http://www.wmo.int/gsearch/gresults_es.html?q=Niebla&submit.x=0&submit.y=0&submit=SEARCH#gsc.tab=0&gsc.q=Niebla&gsc.page=4)

Web-MetEd4: [http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/skewt\\_es/dry\\_adiabat.htm](http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/skewt_es/dry_adiabat.htm)